

ВЕСТНИК

Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова

2026. Т.24, №1

Журнал включен в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук. По результатам экспертной оценки ВАК журнал отнесен к категории К1. По результатам оценки межведомственной комиссии журнал включен в Единый государственный перечень научных изданий «Белый список» – 2 уровень. Журнал индексируется в международных и российских базах данных: Ulrich's Periodicals Directory, Crossref, Google Scholar, RSCI, ядро РИНЦ, ВИНИТИ и др. Электронные версии журнала размещаются на сетевом ресурсе Научной Электронной Библиотеки в сети Интернет.

Издается с марта 2003 года

Председатель редакционной коллегии
В.М. Колокольцев (Россия)

Т.Н. Александрова (Россия), Ж.-Б. Вогт (Франция),
С.Е. Гавришев (Россия), О.Е. Горлова (Россия),
В.Е. Громов (Россия), Я. Грум (Словения),
И.Г. Гун (Россия), М. Дабала (Италия),
Х. Дья (Польша), Р.О. Дюссан (Индия),
Р. Кавалла (Германия), В.Н. Калмыков (Россия),
Д.Р. Каплунов (Россия), А.Г. Корчунов (Россия),
О.С. Логунова (Россия), Д. Милованович (Сербия),
К. Мори (Япония), И. Мусирин (Малайзия),
А.Б. Найзабеков (Казахстан), Н.Н. Орехова (Россия),
М. Пьетшик (Польша), В.Ф. Рашников (Россия),
Г.А. Роджерсон (Великобритания), О.Н. Тулупов (Россия),
Ю Фенг (Китай), В.Р. Храмшин (Россия), Р. Цин (Великобритания)

РЕДАКЦИЯ

Главный редактор О.Н. Тулупов
Первый заместитель главного редактора
М.А. Полякова
Заместители главного редактора:
А.Г. Корчунов, О.С. Логунова,
Н.Н. Орехова, В.Р. Храмшин
Редактор Н.П. Боярова
Технический редактор Т.В. Леонтьева
Перевод на английский А.Р. Карагузина
Дизайн обложки: А.Д. Григорьев

© ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2026

Свидетельство о регистрации ПИ №ФС 77-59632 от 10.10.2014 г.

Выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Учредитель – Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова.
(455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, д. 38).

16+, в соответствии с Федеральным законом №436-ФЗ от 29.12.2010.

Адрес редакции:

455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»
пр. К. Маркса, 45/2, оф. 402
Тел.: (3519) 22-14-93.
URL: <http://www.vestnik.mgtu.ru>
Email: vestnik@mgtu.ru; rio_mgtu@mail.ru

Адрес издателя:

455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. К. Маркса, 45/2,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», издательский центр

Адрес типографии:

455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», участок оперативной полиграфии
Выход в свет 31.03.2026. Заказ 81. Тираж 500 экз. Цена свободная.

VESTNIK

of Nosov Magnitogorsk State Technical University

2026. Vol.24, no.1

The journal is included in the List of Russian Peer-Reviewed Scientific Journals, which are supposed to publish the major results of doctoral and PhD theses. Following an expert assessment of the Higher Attestation Commission, the journal is classified as category K1. According to the results of the evaluation of the interdepartmental commission, the journal is included in the Unified State List of Scientific Publications "White List" level 2. The journal is indexed in international and Russian databases: Ulrich's Periodicals Directory, Crossref, Google Scholar, RSCI, the core of RSCI, VINITI (the All-Russian Institute of Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences), and others. Digital versions of the journal are available at the network resource of the Scientific Electronic Library on the Internet.

PUBLISHED SINCE MARCH, 2003

EDITORIAL BOARD MEMBERS

Head of the Editorial Board V.M. Kolokoltsev (Russia)

T.N. Aleksandrova (Russia), M. Dabala' (Italy),
R.O. Dusane (India), H. Dyja (Poland), Ye Feng (China),
S.E. Gavrishev (Russia), O.E. Gorlova (Russia),
V.E. Gromov (Russia), J. Grum (Slovenia), I.G. Gun (Russia),
V.N. Kalmykov (Russia), D.R. Kaplunov (Russia),
R. Kawalla (Germany), V.R. Khramshin (Russia),
A.G. Korchunov (Russia), O.S. Logunova (Russia),
D. Milovanovic (Serbia), K. Mori (Japan),
I. Musirin (Malaysia), A.B. Naizabekov (Kazakhstan),
N.N. Orekhova, M. Pietrzyk (Poland), R. Qin (UK),
V.F. Rashnikov (Russia), G.A. Rogerson (UK),
O.N. Tulupov (Russia), J.-B. Vogt (France)

EDITORIAL STAFF

Editor-in-Chief O.N. Tulupov

First Deputy Chief Editor M.A. Polyakova

Deputy Chief Editors:
A.G. Korchunov, O.S. Logunova,
V.R. Khramshin, N.N. Orekhova

Editor N.P. Boyarova

Technical Editor T.V. Leontyeva

Translated into English A.R. Karaguzhina

The cover is designed by A.D. Grigorev

© Federal State Budgetary Institution of Higher Education
Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2026

Registration certificate PI # FS 77-59632 dated October 10, 2014 is issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media.

Founder – Nosov Magnitogorsk State Technical University
(38, pr. Lenina, Magnitogorsk, Chelyabinsk Region, 455000)

16+ in accordance with Federal Law №436-FZ dated 29.12.2010

Editorial office:

402, 45/2 Karl Marks prospekt,
Magnitogorsk, Chelyabinsk region, 455000, Russia
Nosov Magnitogorsk State Technical University
Phone: +7 (3519) 221 493.
URL: <http://www.vestnik.magtu.ru>
Email: vestnik@magtu.ru; rio_magtu@mail.ru

Publisher office:

45/2 Karl Marks prospekt, Magnitogorsk, Chelyabinsk region, 455000, Russia
Nosov Magnitogorsk State Technical University

Printing office:

38 Lenin prospekt, Magnitogorsk, Chelyabinsk region, 455000, Russia
Nosov Magnitogorsk State Technical University

Publication date: 31.03.2026. Order 81. Circulation: 500. Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|-----------|
| НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ | 5 |
| <i>Сединкина Н.А., Шавакулева О.П., Горлова О.Е., Панфилова О.Р., Швыдкий О.А.</i> Оценка возможности сухой магнитной сепарации во взвешенном состоянии при обогащении железосодержащих руд..... | 5 |
| <i>Вильмис А.Л., Дробаденко В.П., Дьяченко Е.Н., Некоз К.С., Скрипка А.А., Шалаева А.А.</i> Экспериментальное исследование классификации фракций белого корунда методом электростатической сепарации | 15 |
| <i>Антипин Ю.Г., Никитин И.В.</i> Оптимизация производственной мощности рудника на основе оценки эффективности и выбора оптимального состава комплекса самоходного оборудования..... | 22 |
| ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО | 32 |
| <i>Войтенко В.В., Медведчук С.А., Брешев В.Е., Войтенко Г.О.</i> Экспериментальные исследования оболочечных литейных стержней на эпоксидной смоле | 32 |
| <i>Дубский Г.А., Мишенева Н.И., Долгушин Д.М., Нefeldiev А.А., Мавринский В.В.</i> Математическое моделирование процессов теплопереноса кремния при кристаллизации расплава эвтектического силумина в неоднородном переменном магнитном поле..... | 40 |
| ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ | 48 |
| <i>Зайдес С.А., Ву Куанг Хай</i> Оценка влияния параметров геликоидного упрочнения на распределение напряжений и деформаций в цилиндрических деталях..... | 48 |
| ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ .. | 60 |
| <i>Сергеев Ю.С., Гоголев В.П., Платов С.И., Сергеев С.В., Толмачев Е.В.</i> Развитие методологии адаптивного интеллектуального проектирования с использованием цифровых двойников субтрактивных процессов формообразования внутренних поверхностей лезвийными инструментами..... | 60 |
| <i>Некрасов Р.Ю.</i> Определение режимов обработки цилиндрических втулок буровых насосов, обеспечивающих требуемое качество поверхности | 69 |
| <i>Петроченко С.В., Федоров А.А., Макашин Д.С., Михайленко С.В.</i> Поиск оптимальных значений технологических параметров режима ультразвуковой упрочняющей обработки тел вращения, изготовленных из подшипниковой стали GCr15, предварительно подвергнутых лазерной закалке и шлифованию | 75 |
| <i>Чукин М.В., Копцева Н.В., Ефимова Ю.Ю., Шеметов А.Н.</i> Термоэлектрическая неразрушающая оценка остаточных напряжений в холоднокатаной стальной ленте | 88 |

CONTENTS

| | |
|---|-----------|
| SUBSOIL USE | 5 |
| <i>Sedinkina N.A., Shavakuleva O.P., Gorlova O.E., Panfilova O.R., Shvydkiy O.A.</i> Assessment of the Possibility of Dry Magnetic Separation in a Suspended State During the Enrichment of Iron-Containing Ores..... | 5 |
| <i>Vilmis A.L., Drobadenko V.P., Dyachenko E.N., Nekoz K.S., Skripka A.A., Shalaeva A.A.</i> Experimental Study of the Classification of White Fused Alumina Fractions by Electrostatic Separation | 15 |
| <i>Antipin Yu.G., Nikitin I.V.</i> Optimization of Mine Production Capacity Based on the Efficiency Evaluation and Selection of the Optimal Composition of a Self-Propelled Equipment Complex | 22 |
| FOUNDRY ENGINEERING | 32 |
| <i>Voytenko V.V., Medvedchuk S.A., Breshev V.E., Voytenko G.O.</i> Experimental Studies of Shell Molding Cores Bonded with Epoxy Resin..... | 32 |
| <i>Dubsky G.A., Misheneva N.I., Dolgushin D.M., Nefediev A.A., Mavrinsky V.V.</i> Mathematical Modeling of Silicon Heat and Mass Transfer Processes During Crystallization of Eutectic Silumin Melt in a Non-Uniform Alternating Magnetic Field..... | 40 |
| METAL FORMING | 48 |
| <i>Zaydes S.A., Vu Quang Khai</i> Assessment of the Influence of Helicoidal Strengthening Parameters on the Stress And Strain Distribution in Cylindrical Parts | 48 |
| MATERIAL PROCESS ENGINEERING | 60 |
| <i>Sergeev Yu.S., Gogolev V.P., Platov S.I., Sergeev S.V., Tolmachev E.V.</i> Development of an Adaptive Intelligent Design Methodology Using Digital Twins of Subtractive Processes for Internal Surface Formation with Cutting Tools | 60 |
| <i>Nekrasov R.Yu.</i> Determination of the Treatment Modes of Mud Pump Cylinder Liners that Ensure the Required Surface Quality | 69 |
| <i>Petrochenko S.V., Fedorov A.A., Makashin D.S., Mikhailenko S.V.</i> Search for Optimal Values of Technological Parameters of the Ultrasonic Hardening Treatment Mode for Rotational Bodies Made of Bearing Steel GCr15 Previously Subjected to Laser Hardening and Grinding | 75 |
| <i>Chukin M.V., Koptseva N.V., Efimova Yu.Yu., Shemetov A.N.</i> Thermoelectric Non-Destructive Evaluation of Residual Stresses in Cold-Rolled Steel Strip | 88 |

**УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ.
СТАНДАРТИЗАЦИЯ. ОРГАНИЗАЦИЯ
ПРОИЗВОДСТВА 100**

Маркевич А.В.

Разработка подхода к выбору системы критериев для оценки объективности ультразвукового контроля металлопродукции 100

Родионов Н.В., Загидуллин Р.С.

Разработка методики оценки качества и технологической готовности новых технических решений..... 108

Сафаров Д.Т., Касьянов С.В., Сафарова Л.Р.

Документирование потоков технологий жизненного цикла автокомпонентов для отслеживания характеристик качества 116

Шарафиева Р.Р., Денисова Я.В., Сопин В.Ф.

Фотометрическое определение ингибитора коррозии: роль неопределенности измерений в обеспечении качества аналитических исследований и их результатов 123

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ..... 133

Кузнецов С.В., Rogovik A.A.

Автоматизированное нахождение и распознавание длин деталей типа тела вращения на чертежах с использованием инструментов компьютерного зрения 133

Цициашвили Г.Ш., Лосев А.С., Часовников Д.Р.

Оценка средней площади непокрытия поверхности при порошковом напылении 142

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ 148

Магдеев К.Е., Сердюкова Е.А., Пятых А.С.

Автоматизированная система учета и хранения режущего инструмента 148

НАДЕЖНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ 157

Новикова Т.А., Ляпунцова Е.В.

Разработка инструмента прогнозирования технического состояния оборудования, основанного на суперпозиции функций надежности 157

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И СТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕТАЛЛУРГИИ 168

Кришан А.Л., Астафьева М.А., Парфенов В.В., Вавилин Н.В.

Эффективность применения сильно нагруженных трубобетонных колонн 168

ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И РЫНОК ПРОДУКЦИИ 176

Красносельская Д.Х., Тимирьянова В.М., Прудников В.Б., Гайнцева Е.С.

Пространственная вариация цен в региональном контексте: систематический обзор зарубежной литературы..... 176

Амосов А.И., Кудрявцева С.С., Харитонов Д.В.

Оценка эффективности технологических инноваций на производственном этапе жизненного цикла наукоемкой продукции 192

**PRODUCT QUALITY MANAGEMENT.
STANDARDIZATION. INDUSTRIAL
MANAGEMENT 100**

Markevich A.V.

Development of the Approach to the Selection of Criteria System to Assess the Objectivity of Metal Product Ultrasonic Testing..... 100

Rodionov N.V., Zagidullin R.S.

Development of a Methodology for Assessing the Quality and Technological Readiness of New Technical Solutions 108

Safarov D.T., Kasyanov S.V., Safarova L.R.

Documenting the Technology Flows of Automotive Components Life Cycle to Track Quality Characteristics 116

Sharafieva R.R., Denisova Ya.V., Sopin V.F.

Photometric Determination of a Corrosion Inhibitor: the Role of Measurement Uncertainty in Ensuring the Quality of Analytical Studies and Their Results 123

MODELLING OF METALLURGICAL PROCESSES..... 133

Kuznetsov S.V., Rogovik A.A.

Automated Detection and Recognition of Lengths of Rotational Parts in Technical Drawings Using Computer Vision Tools 133

Tsitsiashvili G.Sh., Losev A.S., Chasovnikov D.R.

Estimation of the Average Uncoated Surface Area During Powder Spraying..... 142

NEW TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT 148

Magdeev K.E., Serdyukova E.A., Pyatykh A.S.

Automated System for Accounting and Storage of Cutting Tools..... 148

RELIABILITY AND DURABILITY OF METALLURGICAL EQUIPMENT 157

Novikova T.A., Lyapunova E.V.

Development of a Tool for Predicting Equipment Technical Condition of Based on the Superposition of Reliability Functions 157

CONSTRUCTION MATERIALS AND CONSTRUCTION ENGINEERING IN METALLURGY 168

Krishan A.L., Astafieva M.A., Parfenov V.V., Vavilin N.V.

Efficiency of Using Heavy Loaded Concrete Filled Steel Tube Columns..... 168

ECONOMICS, MANAGEMENT AND PRODUCT MARKET 176

Krasnoselskaya D.Kh., Timiryanova V.M., Prudnikov V.B., Gaintseva E.S.

Spatial Prices Variation in the Regional Context: a Systematic Review of Foreign Literature 176

Amosov A.I., Kudryavtseva S.S., Kharitonov D.V.

Assessment of the Efficiency of Technological Innovations AT THE Production Stage of the High-Tech Products Life Cycle 192



ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ СУХОЙ МАГНИТНОЙ СЕПАРАЦИИ ВО ВЗВЕШЕННОМ СОСТОЯНИИ ПРИ ОБОГАЩЕНИИ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ РУД

Сединкина Н.А.¹, Шавакулева О.П.¹, Горлова О.Е.^{1,2}, Панфилова О.Р.¹, Швыдкий О.А.¹

¹Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

²Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н. В. Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Необходимость снижения себестоимости и повышения технико-экономических показателей обогащения железосодержащих руд ставит задачи совершенствования технологии обогащения и, в частности, схемы рудоподготовки, так как затраты на рудоподготовку достигают 40% общих затрат. Поэтому на многих горно-обогатительных комбинатах применяется сухая магнитная сепарация для выделения отвальных хвостов. Крупность руды, поступающей на сухую сепарацию, составляет 60(50)-15(10) мм. Руда крупностью 15(10)-0 мм сухой магнитной сепарацией не обогащается вследствие низкой эффективности сепарации на используемых барабанных сепараторах, а поступает на измельчение и мокрую магнитную сепарацию, что приводит к увеличению затрат на измельчение, обогащение и гидротранспорт. Поэтому применение сепараторов во взвешенном состоянии для повышения эффективности разделения железосодержащего сырья является весьма актуальной задачей. **Цель работы.** Установление оптимальных параметров сухой магнитной сепарации во взвешенном состоянии мелкодробленых железосодержащих руд с учетом особенностей их состава и свойств. **Используемые методы.** Исследования проводились на пробах магнетитовой руды Наследницкого месторождения, титаномагнетитовых руд Медведевского, Копанского и Чернореченского месторождений, а также сидеритовой руды Бакальского месторождения на установке для сухой магнитной сепарации во взвешенном состоянии. **Новизна.** Сухая магнитная сепарация во взвешенном состоянии характеризуется высокой избирательностью за счет оригинальной конструкции сепаратора с уменьшающейся по ходу перемещения материала напряженностью магнитного поля и с увеличенной активной зоной сепарации и обеспечивает получение высоких качественно-количественных показателей в случае обогащения мелкодробленых руд крупностью менее 10 мм различного состава. **Результат.** Сухая магнитная сепарация может быть эффективно использована для обогащения железных руд разного вещественного состава. **Практическая значимость.** Состоит в возможности использования сухой магнитной сепарации во взвешенном состоянии для обогащения мелкодробленых железных руд. Данный способ сепарации позволит повысить технико-экономические показатели обогащения и значительно снизить затраты на измельчение.

Ключевые слова: магнитная сепарация, магнетитовая руда, титаномагнетитовая руда, сидеритовая руда, рудоподготовка, вкрапленность, сепарация во взвешенном состоянии, эффективность обогащения

© Сединкина Н.А., Шавакулева О.П., Горлова О.Е., Панфилова О.Р., Швыдкий О.А., 2026

Для цитирования

Оценка возможности сухой магнитной сепарации во взвешенном состоянии при обогащении железосодержащих руд / Сединкина Н.А., Шавакулева О.П., Горлова О.Е., Панфилова О.Р., Швыдкий О.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №1. С. 5-14. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-5-14>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY OF DRY MAGNETIC SEPARATION IN A SUSPENDED STATE DURING THE ENRICHMENT OF IRON-CONTAINING ORES

Sedinkina N.A.¹, Shavakuleva O.P.¹, Gorlova O.E.^{1,2}, Panfilova O.R.¹, Shvydkiy O.A.¹

¹Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

²Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The need to reduce the cost and improve the technical and economic performance of the enrichment of iron-containing ores sets the task of improving the enrichment technology and, in particular, the ore preparation scheme, as the cost of ore preparation reaches 40% of the total cost. Therefore, many mining and processing plants use dry magnetic separation to separate the tailings. The particle size of the ore entering dry separation is 60(50) – 15(10) mm. Ore with a particle size of 15(10)-0 mm is not enriched by dry magnetic separation due to the low efficiency of separation on the drum separators used, and is sent for grinding and wet magnetic separation, which leads to increased costs for grinding, enrichment, and hydrotransport. Therefore, the use of suspended separators to improve the efficiency of separation of iron-containing raw materials is a highly relevant task. **Objectives.** The research is aimed at establishing the optimal parameters for dry magnetic separation in a suspended state of finely crushed iron-containing ores, taking into account their composition and properties. **Methods Applied.** The studies have been conducted on samples of magnetite ore from the Naslednitsky deposit, titanium magnetite ore from the Medvedevsky, Kopansky, and Chernorechensky deposits, and siderite ore from the Bakalsky deposit using a unit for dry magnetic separation in a suspended state. **Originality.** Dry magnetic separation in a suspended state is characterized by high selectivity due to the original design of the separator, which has a decreasing magnetic field strength as the material moves and an increased active separation zone. This ensures high quality and quantity indicators in the case of enriching finely crushed ores with a particle size of less than 10 mm and various compositions. **Result.** Dry magnetic separation can be effectively used for the enrichment of iron ores of various compositions. **Practical Relevance.** It is possible to use dry magnetic separation in a suspended state for the enrichment of finely crushed iron ores. This separation method will improve the technical and economic performance of the enrichment process and significantly reduce the costs of grinding.

Key words: magnetic separation, magnetite ore, titanium magnetite ore, siderite ore, ore preparation, shot, separation in a suspended state, enrichment efficiency

For citation

Sedinkina N.A., Shavakuleva O.P., Gorlova O.E., Panfilova O.R., Shvydkiy O.A. Assessment of the Possibility of Dry Magnetic Separation in a Suspended State During the Enrichment of Iron-Containing Ores. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 1, pp. 5-14. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-5-14>

Введение

Черная металлургия – основной потребитель железного концентрата. Россия наряду с Австралией, Бразилией, Китаем и Индией входит в пятерку крупнейших производителей по объемам выпускаемой железорудной продукции (концентратов, окатышей, агломерата и продуктов прямого восстановления железа) и является одним из мировых лидеров по изготовлению стали.

Россия обладает богатой сырьевой базой железных руд и занимает второе место по запасам этого минерального сырья, но большинство из них не обладают высоким качеством. Так, по данным Государственного доклада о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2023 году [1] балансовые запасы железных руд в нашей стране оцениваются в 118,4 млрд т. Они заключены в 207-ми месторождениях. На долю забалансовых запасов приходится 15 млрд т железных руд, которые сосредоточены в 23-х месторождениях

(рис. 1). Отмечено, что сырьевая база железных руд позволит обеспечить потребности российской экономики в долгосрочной перспективе до 2035 года.

Уральский федеральный округ является вторым регионом по запасам и добыче железных руд в России (15,9 % запасов), обеспечивающим 19,2% всей добычи. Основные запасы железа сосредоточены в месторождениях ванадийсодержащих титаномагнетитовых руд, наиболее крупными из которых являются Суроямское, Гусевогорское и Собственно-Качканарское месторождения [2]. Руды этих месторождений могут значительно снизить нехватку собственного железосодержащего сырья. Однако они относятся к труднообогатимым, требующим многостадийного обогащения и тщательной подготовки руды к обогащению [3]. Перспективным источником железорудного сырья на Южном Урале также могут стать значительные запасы бурожелезняковых руд в Зигазино-Комаровско-Инзерском районе Республики Башкортостан, которые в настоящее время не перерабатываются [4].

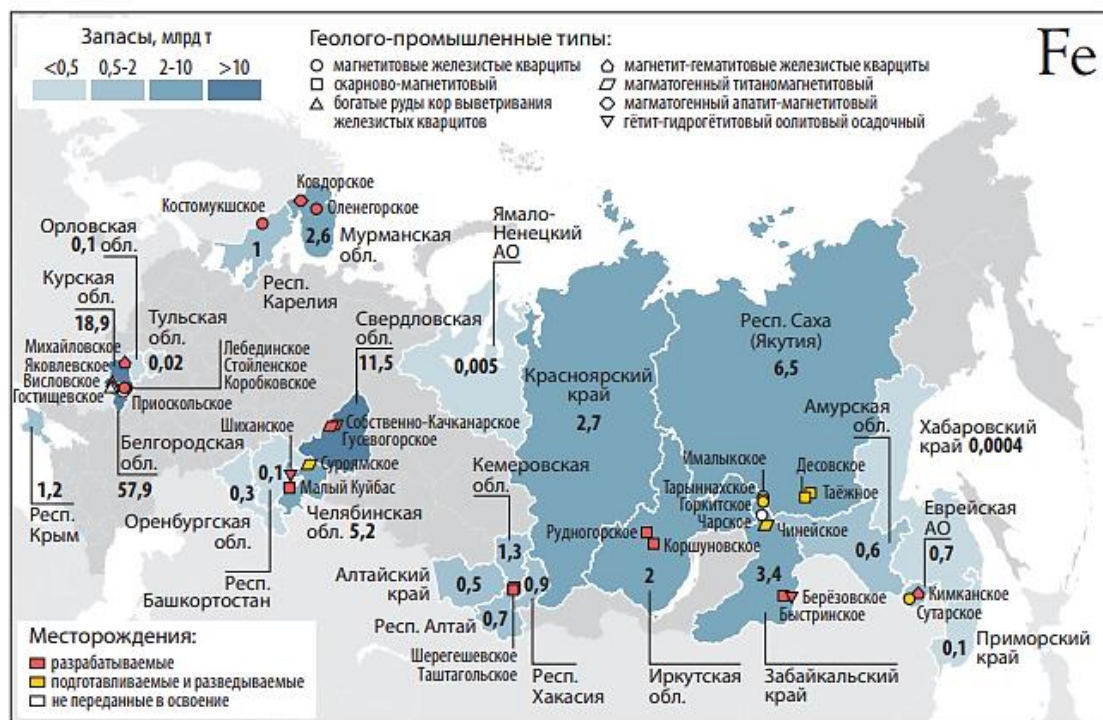


Рис. 1. Распределение запасов железных руд между субъектами Российской Федерации (млрд т) и их основные месторождения [1]

Fig. 1. Distribution of iron ore reserves between the constituent entities of the Russian Federation (billion tons) and their main deposits [1]

Основным методом обогащения железных руд является магнитный [5], при условии наличия достаточных магнитных свойств у ценных компонентов для их выделения. На большинстве обогатительных фабрик технология обогащения магнетитовых и титаномагнетитовых руд включает операции рудоподготовки, состоящие из трех-четырёх стадий дробления и одной или двух стадий измельчения до крупности 55-60% класса менее 0,074 мкм, и операции магнитной сепарации [6]. Часто в первых стадиях обогащения используют сухую магнитную сепарацию на стандартных барабанных сепараторах с целью выделения первичных хвостов и снижения затрат на последующую переработку [7-9].

Известно, что сухой магнитной сепарации подвергаются руды крупностью 60(50) – 15(10) мм, такой широкий диапазон крупности приводит к большой вероятности потерь железа с хвостами [10, 11]. Уменьшение крупности материала увеличивает степень раскрытия сростков минералов и возможность повышения технологических показателей. Однако при сухой магнитной сепарации руды крупностью менее 10 мм на барабанных сепараторах происходит обратный эффект – значительно повышаются потери железа с немагнитным продуктом. Это объясняется образованием флокул, состоящих из магнетита и механически захваченных частиц, а также налипших мелких магнитных частиц на немагнитные частицы [12].

С целью повышения эффективности сухой магнитной сепарации железосодержащих руд предложен

способ сухой магнитной сепарации во взвешенном состоянии [13].

Материалы и методы исследования

Объектом исследования являлась сухая магнитная сепарация во взвешенном слое, предметом исследования – эффективность её применения для разных типов руд.

В работе рассмотрены скарновые сульфидно-магнетитовые руды Наследнического месторождения. По вещественному составу руды месторождения разделяются на сплошные, вкрапленные и окисленные. Текстура пород прожилковая, структура крупнозернистая. Рудная минерализация пробы представлена массивными рудами, составляющими 70–85% от общего объема. Преобладающим минералом является магнетит – его количество составляет 50–70% от общего количества рудных минералов. Помимо магнетита, в рудах присутствует пирротин (15–35%), пирит (5–15%) и халькопирит (5–10%), в единичных выделениях отмечается сфалерит, галенит и кобальтин. Магнетит образует массивные выделения. Зерна магнетита имеют гипидиоморфную форму, реже ксеноморфную. Размер зерен магнетита составляет от 50 мкм до 5 мм. Зерна магнетита сцементированы пирротинном и халькопиритом. Нерудные минералы представлены: кальцитом – 10–50%, клинопироксенном (диопсид) – до 10–12%, амфиболом – 5–6%, мусковитом (серичит) – до 10-15% и хлоритом – 6–7%.

Были изучены руды Медведевского, Копанского, Чернореченского месторождений. По количественному соотношению рудных минералов эти месторождения делятся на сплошные титаномагнетитовые и вкрапленные. Размер зерен основной части рудных минералов (ильменита и титаномагнетита) колеблется от 1,5 до 0,5 мм. В состав руд входят силикатные минералы (пироксены, амфибол, плагиоклаз, соссюрит и др.) и рудные минералы (титаномагнетит, ильменит и магнетит). Доля этих руд в месторождении составляет около 78% при массовой доле диоксида титана до 7–9% и железа до 17–19%. Магнетит является наиболее распространенным минералом в составе как сплошных, так и вкрапленных руд. Содержание его составляет от 15–20 до 70–90%. Размеры зерен магнетита колеблются в широких пределах – от 0,05–0,08 до 1,5–2,0 мм. Вторым по степени распространения рудообразующим минералом является ильменит, содержание которого составляет от 10 до 30% от рудной массы. Химический анализ титаномагнетитовой руды показал значительную массовую долю в ней диоксида титана, которая достигает 12,0–12,7%. Массовая доля железа составляет 22,0–23,0%. Исследование структурно-текстурных особенностей руды показало, что зерна магнетита пронизаны точечными и пластинчатыми включениями ильменита.

Сидеритовая руда Бакальского месторождения относится к карбонатному типу. Карбонатные (сидеритовые) руды Бакала характеризуются сложным и непостоянным химико-минералогическим составом. Основным железорудным минералом данного месторождения является изоморфная смесь карбонатов железа, магния и марганца, которые встречаются в различном количественном соотношении – сидероплезит и пистомезит (до 80–95% рудной массы). Из нерудных минералов присутствуют кварц, анкерит, пирит, барит и другие минералы. Химический анализ руды показал массовую долю железа в пределах 28,2–32,5%. Изучение структуры сидерита свидетельствует о равномерно или неравномерно зернистой до тонко- и крупнозернистой. Форма зерен неправильная, близкая к изометрической. Текстура у сидеритовой руды и вмещающих карбонатных пород разнообразна.

Магнитное обогащение осуществляется в магнитных сепараторах, характерной особенностью которых является наличие в их рабочей зоне магнитного поля, в котором проявляется действие магнитных сил на намагниченные тела [14]. Действие этих сил объясняется наличием в телах быстро движущихся внутримолекулярных электрических зарядов. Разделение минеральных частиц по магнитным свойствам осуществляется успешно в том случае, когда эти магнитные свойства частиц существенно различаются между собой, а конструкция магнитного сепаратора обеспечивает необходимую селективность разделения по магнитным свойствам [15,16].

Физическая сущность магнитной сепарации заключается в том, что магнитное поле изменяет траекторию движения минералов, обладающих соответствующими магнитными свойствами, чем вызывает

их извлечение из потока других минералов, которые таких свойств не имеют.

В магнитных сепараторах применяются только неоднородные по напряженности поля, которые создаются соответствующей формой и расположением полюсов магнитной системы. Чем выше неоднородность поля, тем сильнее магнитная частица притягивается к полюсу в направлении сходимости магнитных силовых линий, которые выходят из северного и входят в южный полюс. Это изменение полярности вызывает переориентацию намагниченных частиц, что позволяет повысить качество концентрата.

Для обогащения железосодержащих руд применяются сепараторы для сухого и мокрого обогащения. Использование сухой сепарации имеет ряд преимуществ перед использованием сепараторов в водной среде [17]. Так, при использовании сухой магнитной сепарации руды удешевляется ее подготовка перед самой сепарацией вследствие резкого снижения затрат на электроэнергию, потребляемую мельницами, снижаются объемы руды, поступающие на дальнейшую переработку, повышается качество исходной руды, поступающей на мокрую магнитную сепарацию, что значительно сокращает количество самих операций обогащения. Однако процесс сухой магнитной сепарации усложняется тем, что в нем участвует большое количество частиц сепарируемого материала различной крупности, с различными физическими свойствами [18].

Известно, что одним из важнейших факторов, определяющих эффективность обогащения сухой магнитной сепарации, является крупность обогащаемого материала и различное соотношение магнитных и немагнитных минералов. В первом случае влияние оказывают различные механические свойства руды, отсюда разнообразная форма и размер раздробленной руды, во втором случае – расположение и доля железосодержащих зерен в руде.

Сепарация мелкодробленого материала в практике обогащения железосодержащих руд не нашла широкого использования за счет значительных потерь железа. С решением этой проблемы успешно справляется сепаратор во взвешенном состоянии (рис. 2).

Сухая магнитная сепарация во взвешенном состоянии является высокоэффективным процессом обогащения мелких продуктов, что объясняется практически полным отсутствием механического выноса немагнитных частиц в магнитный продукт, очисткой поверхности извлекаемых магнитных частиц от налипших мелких немагнитных и разрушением магнитных флокул в процессе сепарации.

В сепараторе обеспечивается неоднократное вытягивание частиц с различной скоростью из слоя материала и их отрыв от магнитной системы, что вызывает высвобождение и выпадение механически увлеченных частиц, самоочистку сталкивающихся частиц от налипших мелких частиц и повышение качества магнитного продукта в каждой последующей зоне сепарации.

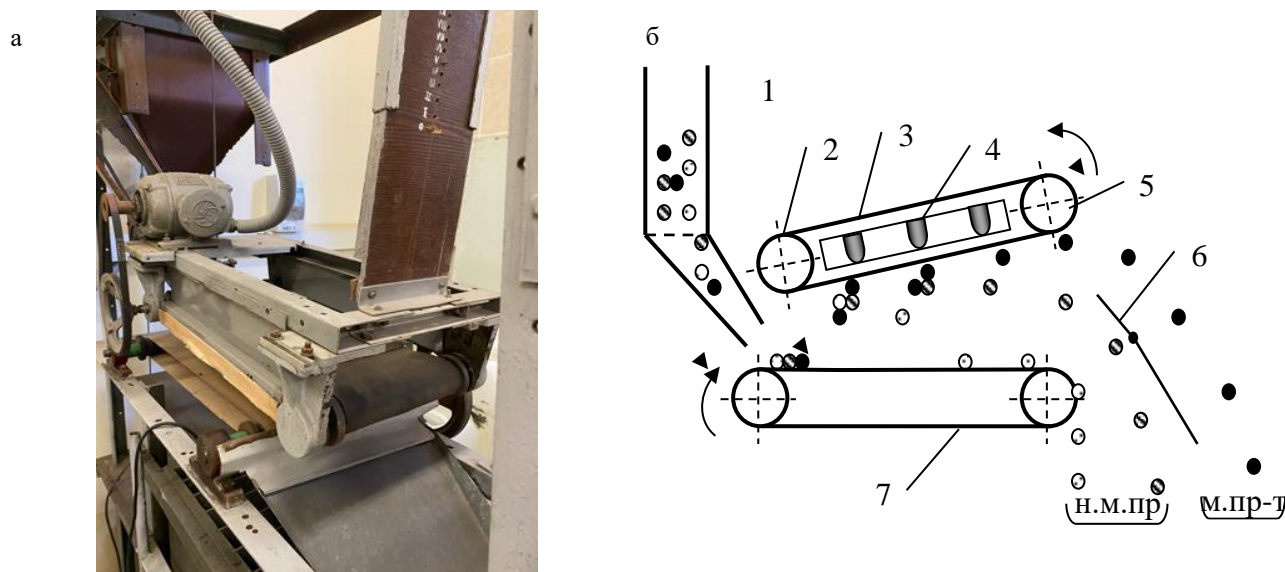


Рис. 2. Экспериментальная установка для сухой магнитной сепарации материала во взвешенном состоянии: а – фотография; б – принципиальная схема; 1 – бункер; 2 – хвостовой барабан; 3 – лента для съёма магнитного продукта; 4 – магнитная система; 5 – приводной барабан; 6 – регулирующий шибер; 7 – ленточный конвейер

Fig. 2. Experimental unit for dry magnetic separation of suspended material: a is photograph; б is schematic diagram; 1 is bunker; 2 is tail drum; 3 is magnetic product removal belt; 4 is magnetic system; 5 is drive drum; 6 is regulating gate; 7 is belt conveyor

За счет увеличения активной зоны сепарации повышается и полнота извлечения магнитных частиц. Уменьшение максимальной напряженности поля по ходу перемещения материала обеспечивает неоднократную перемычку магнитного продукта, образующегося в первой зоне сепарации. Поскольку в каждой зоне сепарации в первую очередь отрываються наиболее слабомагнитные и в последнюю очередь сильномагнитные частицы, то одновременно происходит подготовка материала к перемычке в каждой последующей зоне.

Все исследования выполнены на лабораторной установке для сухой магнитной сепарации материала во взвешенном состоянии. Для подготовки к исследованиям руда дробилась на лабораторной конусной дробилке типа ВКМД 10 до крупности 50-0 мм и подвергалась рассеvu на ситах с размером отверстий 40, 30, 15, 10 и 7 мм. Для получения продукта крупностью 15-0, 10-0 и 7-0 мм использовались щековая типа ШД 6 и валковая ДВГ 200×125 дробилки. Проведены испытания на лабораторном барабанном магнитном сепараторе 138Т-СЭМ. Массовая доля железа в продуктах обогащения определялась титриметрическим методом по ГОСТ 32517.1-2013 (ISO2597-1:2005).

Полученные результаты и их обсуждение

Магнетитовая руда относится к легкообогатимым рудам, поэтому для установления оптимальных параметров работы сепаратора во взвешенном состоянии была изучена магнетитовая руда Наследницкого месторождения [19-21].

Известно, что магнитная сепарация осуществляется только в неоднородном магнитном поле. При этом напряженность магнитного поля должна обеспечить магнитную силу, достаточную для перемещения частицы с определенной магнитной восприимчивостью в направлении большей напряженности поля. Изучение распределения напряженности магнитного поля в рабочей зоне установки для сухой магнитной сепарации во взвешенном состоянии показало, что силовые линии магнитного поля направлены в сторону перемещения материала, что способствует более эффективному извлечению магнетита в магнитный продукт. Благодаря чередующейся полярности магнитов и наличию межполюсного расстояния происходит перемешивание частиц, поворот их на определенный угол и отрыв от магнитной системы, что позволит очистить магнитный продукт от механически увлеченных немагнитных частиц и повысить качество концентрата [22, 23]. Определено, что максимальная напряженность магнитного поля на поверхности магнитной системы составляет 198 кА/м.

На характеристику поля многополюсной открытой магнитной системы оказывает влияние межполюсное расстояние (a , м), шаг полюсов (S , м), ширина полюса (b , м), а также форма полюсов или полюсных наконечников.

Результаты изучения влияния шага полюсов магнитной системы на технологические показатели обогащения магнетитовой руды Наследницкого месторождения крупностью 10-0 мм представлены в табл. 1.

Таблица 1. Влияние шага полюсов на показатели обогащения
Table 1. The effect of pole pitch on enrichment indicators

| Наименование показателей обогащения | Шаг полюсов, м | | | |
|--|----------------|-------|-------|-------|
| | 0,10 | 0,13 | 0,16 | 0,19 |
| Выход магнитного продукта, % | 56,16 | 53,91 | 51,97 | 49,69 |
| | 58,32 | 54,56 | 52,17 | 51,46 |
| Массовая доля железа в магнитном продукте, % | 50,79 | 52,79 | 54,58 | 56,54 |
| | 49,09 | 52,35 | 54,18 | 54,23 |
| Извлечение железа в магнитный продукт, % | 88,04 | 87,84 | 87,54 | 86,72 |
| | 88,36 | 88,15 | 87,25 | 86,14 |

Примечание. Числитель – показатели при параллельном расположении лент, знаменатель – при угле, равном 10°; массовая доля железа в исходной руде составляет 32,4%.

Результаты изучения влияния шага полюсов на показатели обогащения магнетитовой руды показали, что при увеличении шага полюсов выход магнитного продукта и извлечение в него железа снижается, а массовая доля железа повышается. Это происходит вследствие того, что при увеличении шага полюсов магнитные частицы, попадая в зону действия первого магнита, образуют магнитные пряди. При перемещении ко второму магниту происходит отрыв и переориентация магнитных частиц, а также выпадение из прядей механически увлеченных частиц. При этом длина пряди уменьшается, а прочность повышается. Дальнейшее перемещение к третьему магниту обеспечивает практически полное удаление немагнитных частиц, что приводит к повышению качества концентрата. Оптимальное значение шага полюсов принимается равным 0,16 м.

На характеристику поля многополюсной системы оказывает отношение ширины полюса b к ширине межполюсного расстояния a . Экспериментально установлено, что оптимальным отношением b/a является 1,25.

Межполюсное расстояние магнитной системы установки для сухой магнитной сепарации во взвешенном состоянии является основным показателем, обеспечивающим эффективное разделение сильномагнитного мелкодробленного материала. Межполюсное расстояние обеспечивает отрыв частиц от магнитной системы и зависит от напряженности магнитного поля, высоты слоя руды и расстояния от магнитной системы до слоя руды. Для установления оптимального значе-

ния межполюсного расстояния магнитной системы при сепарации во взвешенном состоянии было изучено распределение напряженности магнитного поля и gradH в рабочей зоне сепаратора и влияние расстояния от магнитной системы (0; 0,005; 0,01 и 0,02 м) до слоя руды на напряженность магнитного поля и gradH. Установлено, что оптимальное расстояние от полюса до конвейерной ленты составляет 0,005–0,01 м.

Одним из показателей эффективной работы сепаратора является скорость перемещения материала. Влияние скорости перемещения материала на показатели разделения мелкодробленного материала крупностью 10-0 мм приведено в табл. 2.

Данные, приведенные в табл. 2, показывают, что при увеличении скорости перемещения тонкозернистого материала с 0,18 до 0,28 м/с выход магнитного продукта в него железа увеличивается с 54,87 до 55,85%, а извлечение возрастает с 84,95 до 88,55%, при этом и массовая доля железа в магнитном продукте увеличивается с 50,16 до 51,37%. Это объясняется тем, что при небольшой скорости перемещения материала происходит только переориентация и частичный разрыв наиболее длинных флокул и этого недостаточно для полного удаления немагнитных частиц из флокул. С увеличением скорости до 0,28 м/с и частоты поля качество магнитного продукта повышается за счет более интенсивного разрушения флокул. При дальнейшем увеличении скорости перемещения материала до 0,8 м/с происходит резкое снижение показателей обогащения. Это объясняется тем, что при такой скорости перемещения руды частицы не успевают оторваться от поверхности конвейерной ленты и все выделяются в магнитный продукт, тем самым загрязняя его. Таким образом, установлено, что оптимальное значение скорости перемещения материала в рабочей зоне сепаратора во взвешенном состоянии составляет 0,28 м/с.

Одним из важных параметров обогащения сухой магнитной сепарацией является крупность обогащаемого материала. Для интенсификации процесса сухой магнитной сепарации были проведены исследования по изучению влияния крупности магнетитовой руды на показатели обогащения (табл. 3).

Результаты магнитной сепарации магнетитовой руды различной крупности показали, что при снижении размера материала с 50-15 до 30-7 мм потери железа с немагнитным продуктом снизились с 11,5 до 9,36%. При этом массовая доля железа в магнитном продукте увеличивается почти на 1,8%. Таким образом, оптимальным значением крупности руды, поступающей на сухую магнитную сепарацию, является класс 30-7 мм.

Таблица 2. Влияние скорости перемещения мелкодробленного материала на показатели обогащения
Table 2. Influence of the movement speed of finely crushed material on enrichment indicators

| Наименование показателей обогащения | Скорость перемещения руды в рабочей зоне сепаратора, м/с | | | | | | |
|--|--|-------|-------|-------|-------|-------|--|
| | 0,18 | 0,22 | 0,28 | 0,37 | 0,55 | 0,8 | |
| Выход магнитного продукта, % | 54,87 | 55,17 | 55,85 | 53,28 | 17,30 | 5,28 | |
| Массовая доля железа в магнитном продукте, % | 50,16 | 51,13 | 51,37 | 52,27 | 52,23 | 52,14 | |
| Извлечение железа в магнитный продукт, % | 84,95 | 87,07 | 88,55 | 85,97 | 27,89 | 8,5 | |

Примечание. Высота подъема магнитной системы 0,01 м; массовая доля железа в исходной руде составляет 32,4%.

Таблица 3. Результаты сухой магнитной сепарации во взвешенном состоянии магнетитовой руды различной крупности

Table 3. Results of dry magnetic separation of suspended magnetite ore of various particle sizes

| Крупность руды, мм | Наименование продукта | Выход, % | Массовая доля железа, % | Извлечение железа, % |
|--------------------|-----------------------|----------|-------------------------|----------------------|
| 50-15 | Магнитный | 63,66 | 45,04 | 88,50 |
| | Немагнитный | 36,34 | 10,25 | 11,50 |
| 50-10 | Магнитный | 64,20 | 44,92 | 89,00 |
| | Немагнитный | 35,80 | 9,96 | 11,00 |
| 50-7 | Магнитный | 63,27 | 45,64 | 89,13 |
| | Немагнитный | 36,73 | 9,58 | 10,87 |
| 40-7 | Магнитный | 62,95 | 46,20 | 89,77 |
| | Немагнитный | 37,05 | 8,95 | 10,23 |
| 30-7 | Магнитный | 62,79 | 46,77 | 90,64 |
| | Немагнитный | 37,21 | 8,15 | 9,36 |

Примечание. Массовая доля железа в исходной руде составляет 32,4%.

Были проведены исследования сепарации во взвешенном состоянии при крупности магнетитовой руды 15-0, 10-0 и 7-0 мм. Результаты обогащения (табл. 4) показывают, что при уменьшении крупности руды выход магнитной фракции и извлечение в нее железа повышаются. Так, при снижении крупности руды с 15-0 до 7-0 мм выход магнитной фракции повышается с 33,46 до 42,48%, а извлечение железа увеличивается с 58,27 до 71,23%. При этом массовая доля железа в магнитной фракции снижается незначительно – с 56,42 до 54,32%. Это свидетельствует о высокой избирательности процесса сухой магнитной сепарации во взвешенном состоянии. Таким образом, исследования, проведенные на магнетитовой руде Наследницкого месторождения, позволили установить рациональные конструктивные и технологические параметры данного процесса.

Для оценки перспективности применения сухой магнитной сепарации во взвешенном состоянии мелкодробленого продукта для железных руд Медвед-

ского, Копанского и Чернореченского месторождений, а также сидеритовой руды Бакальского месторождения проведен сравнительный анализ обогащения этих руд на барабанном сепараторе и сепараторе во взвешенном состоянии, результаты которого представлены в табл. 5. Крупность исходного продукта составила 7-0 мм, напряженность магнитного поля на барабанном сепараторе и сепараторе во взвешенном состоянии – 105 кА/м, угол подъема магнитной системы – 10°, высота подъема частиц – 40 мм, скорость перемещения материала – 0,28 м/с.

Таблица 4. Влияние крупности руды на показатели обогащения

Table 4. The effect of ore particle size on enrichment indicators

| Крупность руды, мм | Наименование продукта | Выход, % | Массовая доля железа, % | Извлечение железа, % |
|--------------------|-----------------------|----------|-------------------------|----------------------|
| 15-0 | Магнитный | 33,46 | 56,42 | 58,27 |
| | Немагнитный | 66,54 | 20,32 | 41,73 |
| 10-0 | Магнитный | 37,77 | 55,10 | 64,24 |
| | Немагнитный | 62,23 | 18,62 | 35,76 |
| 7-0 | Магнитный | 42,48 | 54,32 | 71,23 |
| | Немагнитный | 57,52 | 16,21 | 28,77 |

Примечание. Угол подъема магнитной системы – 10°, напряженность магнитного поля – 105 кА/м, высота подъема частиц – 40 мм, скорость перемещения материала – 0,28 м/с, массовая доля железа в исходной руде составляет 32,4%.

Полученные результаты магнитной сепарации различных железосодержащих руд показали эффективность применения сепарации во взвешенном состоянии. Использование совершенствованного способа магнитной сепарации дает повышение массовой доли железа в магнитном продукте в среднем на 5% и снижение потерь железа с хвостами обогащения в среднем на 12%. Проведенные исследования позволяют рекомендовать сухую магнитную сепарацию во взвешенном состоянии для обогащения магнетитовых, титаномагнетитовых и сидеритовых руд крупностью менее 10 мм.

Таблица 5. Результаты сравнительного магнитного разделения различных типов железных руд

Table 5. Results of comparative magnetic separation of different types of iron ores

| Наименование руды | Наименование продукта | Способ магнитной сепарации | | | |
|--|-----------------------|----------------------------|---------------|-----------------------------------|---------------|
| | | На барабанном сепараторе | | Сепарация во взвешенном состоянии | |
| | | Массовая доля железа, % | Извлечение, % | Массовая доля железа, % | Извлечение, % |
| Титаномагнетитовая Медведского месторождения | Магнитный | 31,5 | 64,1 | 36,1 | 78,4 |
| | Немагнитный | 11,6 | 35,9 | 10,7 | 21,6 |
| | Исходный | 19,5 | 100,0 | 19,5 | 100,0 |
| Титаномагнетитовая Копанского месторождения | Магнитный | 30,3 | 65,9 | 34,9 | 77,2 |
| | Немагнитный | 14,5 | 34,1 | 9,9 | 22,8 |
| | Исходный | 22,1 | 100,0 | 22,1 | 100,0 |
| Титаномагнетитовая Чернореченского месторождения | Магнитный | 30,8 | 65,5 | 36,2 | 76,2 |
| | Немагнитный | 12,5 | 34,5 | 8,6 | 23,8 |
| | Исходный | 20,5 | 100,0 | 20,5 | 100,0 |
| Сидеритовая Бакальского месторождения | Магнитный | 35,4 | 60,5 | 42,8 | 71,0 |
| | Немагнитный | 21,9 | 39,5 | 15,7 | 29,0 |
| | Исходный | 28,5 | 100,0 | 28,5 | 100,0 |
| Магнетитовая Наследницкого месторождения | Магнитный | 52,3 | 67,1 | 57,3 | 79,1 |
| | Немагнитный | 18,24 | 32,9 | 12,3 | 20,9 |
| | Исходный | 32,4 | 100,0 | 32,4 | 100,0 |

Заключение

Проведённые исследования подтвердили высокую эффективность и технологическую перспективность сухой магнитной сепарации во взвешенном состоянии для предварительного обогащения мелкодробленых железных руд (крупностью менее 10 мм) различного генезиса.

Основные научно-практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Установлены и оптимизированы ключевые параметры процесса для руды Наследницкого месторождения:

- оптимальный шаг полюсов магнитной системы – 0,16 м;
- оптимальная скорость перемещения материала в рабочей зоне – 0,28 м/с;
- рекомендуемое расстояние от магнитной системы до слоя руды – 40 мм;
- наиболее эффективная крупность питания для данного процесса – 7-0 мм.

2. Доказана принципиальная возможность и эффективность обогащения тонких классов (7-0 мм), что является значительным преимуществом сепарации во взвешенном слое перед традиционной сепарацией на барабанном сепараторе. Для магнетитовой руды Наследницкого месторождения крупностью 7-0 мм достигнуто извлечение железа в магнитный продукт на уровне 71,23%, при массовой доле железа 54,32%.

3. Проведён сравнительный анализ с традиционной барабанной сепарацией для широкого спектра руд. Установлено, что сепарация во взвешенном состоянии обеспечивает:

- повышение массовой доли железа в магнитном концентрате в среднем на 5%;
- снижение потерь железа с хвостами в среднем на 12 %.

Наиболее значимый эффект продемонстрирован для труднообогащаемых титаномагнетитовых руд (месторождения Медведевское, Копанское, Чернореченское), где извлечение железа возросло в среднем на 11-14%.

Таким образом, сухая магнитная сепарация во взвешенном состоянии представляет собой научно обоснованную и технологически отработанную альтернативу, способную решить актуальную проблему повышения эффективности обогащения мелкодробленых железных руд и снижения себестоимости концентрата.

Список источников

1. Гальянов А.В., Яковлев В.Л., Гордеев В.А. Сырьевая база промышленного комплекса черной металлургии России. Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. 340 с.
2. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2023 году». 2024. 714 с.
3. Бузмаков В.Н., Володина Ю.В. Титаномагнетитовые месторождения как перспективная сырьевая база металлургии Урала (на основе опыта разработки Качкарской группы месторождений) // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения

памяти П.Н. Чирвинского: сборник научных статей; ПГНИУ. Пермь, 2022. Вып. 25. С. 27-33.

4. Перспективы переработки бурожелезняковых руд Южного Урала / Колодежная Е.В., Горлова О.Е., Шадрунова И.В., Гаркави М.С., Хардин И.С., Шавакулева О.П. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №3. С. 5-16. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-5-16>.
5. Современные тенденции в развитии технологий переработки железных руд / Т.И. Юшина, Е.Л. Чантурия, А.М. Думов, А.В. Мясков // Горный журнал. 2021. № 11. С. 75-83.
6. Совершенствование технологии получения магнетитового концентрата при обогащении магнетит-апатитовых руд / А.С. Опалев, С.А. Алексеева, А.А. Паливода, Р.В. Калужная // Обогащение руд. 2024. № 3. С. 3-9.
7. Пелевин А.Е. Применение сухой магнитной сепарации в схемах обогащения ильменит-титаномагнетитовых руд // Обогащение руд. 2025. № 2. С. 32-37.
8. Пелевин А.Е. Моделирование результатов сухого магнитного обогащения слабомагнитных минералов в валковых сепараторах // Обогащение руд. 2024. № 1. С. 19-26.
9. Пелевин А.Е. Повышение эффективности обогащения железорудного сырья путем применения сепарации в повышенном магнитном поле // Черные металлы. 2022. № 1. С. 31-36.
10. Turkenich A.M., Lapshin E.S., Dudnik V. I. Continuous barrier separation of weakly magnetic ores in the field of repulsive magnetic force // Magnetic and Electrical Separation. 1997, vol. 8, no. 2, pp. 81-87.
11. Dry magnetic separation of magnetite ores / Chokin K.S., Yedilbayev A.I., Yedilbayev B.A., Yugay V.D. // Periodico Tchc Quimica. 2020. vol. 17, no. 34, pp. 700-710.
12. Едильбаев А.И. Разработка технологий обогащения бедного железорудного сырья // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. № 10. С. 247-251.
13. Пелевин А.Е. Оценка возможности снижения потерь железа с хвостами сухой магнитной сепарации // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: материалы XXIX Международной научно-технической конференции, проводимой в рамках XXII Уральской горнопромышленной декады 01-10 апреля 2024 г. Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2024. С. 6-9.
14. Сединкина Н.А. Влияние различных параметров на сепарацию промпродукта ДОФ-5 ОАО «ММК» // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2007. № 3(19). С. 22-25.
15. Газалеева Г.И., Сопина Н.А., Мушкетов А.А. Особенности технологии обогащения титаномагнетитовых руд Масальского месторождения (Республика Казахстан) // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № S1-4. С. 94-103.
16. Колокольцев В.М., Бигеев В.А., Ключковский С.П. Применение методов пиро- и гидрометаллургии для переработки сидеритовых руд // Горный журнал. 2012. № S3. С. 22-24.
17. Пути снижения уровня потерь при комплексной добыче и переработке железистых кварцитов / Рудская Л.В., Кулешов В.В., Новикова Г.И., Костромина Л.П. // Из-

- вестия Юго-Западного государственного университета. 2013. № 3(48). С. 228-233.
18. Kuskov V.L., Lvov V.V., Yushina T.I. Increasing the recovery ratio of iron ores in the course of preparation and processing // CIS Iron and Steel Review. 2021, no. 21, pp. 4-8.
 19. Ismagilov R.I., Yushina T.I., Dumov A.M. Contrast range examination of rich iron ore from Mikhailovskoe deposit and evaluation of possibility of its preliminary concentration via physical methods // CIS Iron and Steel Review. 2023, vol. 26, pp. 22-32.
 20. Чижевский В.Б., Сединкина Н.А., Шавакулева О.П. Изучение основных параметров магнитного поля установки для магнитной сепарации во взвешенном состоянии // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: материалы Международной научно-технической конференции. Екатеринбург: Форт Диалог-Исеть, 2008. С. 63-66.
 21. Чижевский В.Б., Горлова О.Е., Сединкина Н.А. Влияние конструктивных параметров установки на показатели сепарации мелкодробленых продуктов во взвешенном состоянии // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: материалы Международной научно-технической конференции. Екатеринбург: Изд-во АМБ, 2006. С. 266-270.
 22. Факторы, влияющие на процесс сухой магнитной сепарации во взвешенном состоянии / Сединкина Н.А., Павелин А.В., Хисаметдинова Д.Н., Мубаряков Р.С. // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. Магнитогорск, 2014. Т. 1. С. 39-42.
 23. Пелевин А.Е., Сытых Н.А., Черепанов Д.В. Влияние крупности частиц на эффективность сухой магнитной сепарации // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. № 11-1. С. 293-305. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_293.
 - processing. *Gorniy zhurnal* [Mining Journal]. 2021;(11):75-83. (In Russ.)
 6. Opalev A.S., Alekseeva S.A., Palivoda A.A., Kalyuzhnaya R.V. Improving the technology for obtaining magnetite concentrate in the processing of magnetite apatite ores. *Obogashchenie Rud* [Ore enrichment]. 2024;(3):3-9. (In Russ.)
 7. Pelevin A.E. Application of dry magnetic separation in beneficiation processes for ilmenite-titanomagnetite ores. *Obogashchenie Rud* [Ore enrichment]. 2025;(2):32-77. (In Russ.)
 8. Pelevin A.E. Modeling of dry magnetic separation results for weakly magnetic minerals processed in roll separators. *Obogashchenie Rud* [Ore enrichment]. 2024;(1):19-26. (In Russ.)
 9. Pelevin A.E. Increasing the efficiency of iron ore raw materials beneficiation by separation in an increased magnetic field. *Chernye metally* [Ferrous metals]. 2022;(1):31-36. (In Russ.)
 10. Turkenich A.M., Lapshin E.S., Dudnik V.I. Continuous barrier separation of weakly magnetic ores in the field of repulsive magnetic force. *Magnetic and Electrical Separation*. 1997;8(2):81-87.
 11. Chokin K.S., Yedilbayev A.I., Yedilbayev B.A., Yugay V.D. Dry magnetic separation of magnetite ore. *Periodico Tche Quimica*. 2020;17(34):700-710.
 12. Yedilbayev A.I. Development of technologies for enrichment of poor iron ore raw materials. *GIAB* [Mining informational and analytical bulletin]. 2011;(10):247-251. (In Russ.)
 13. Pelevin A.E. Assessment of the possibility of reducing iron losses with the tailings of dry magnetic separation. *Nauchnye osnovy i praktika pererabotki rud i tekhnogennogo syr'ya. Materialy XXIX Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, provodimoy v ramkah XXII Uralskoy gornopromyshlennoy dekady* [Scientific foundations and practice of processing ores and man-made raw materials. Proceedings of the XXIX The International Scientific and Technical Conference held within the framework of the XXII Ural Mining Decade]. Yekaterinburg: Publishing House of Ural State Mining University, 2024, pp. 6-9. (In Russ.)
 14. Sedinkina N.A. Influence of various parameters on the separation of the intermediate product DOF-5 of JSC MMK. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2007;(3(19)):22-25. (In Russ.)
 15. Gazaleeva G.I., Sopina N.A., Mushketov A.A. Features of the technology of processing titanium-magnetite ores of the Masalsky deposit (Republic of Kazakhstan). *GIAB* [Mining informational and analytical bulletin]. 2015;(S1-4):94-103. (In Russ.)
 16. Kolokoltsev V.M., Bigeev V.A., Klochkovskiy S.P. Application of methods of pyro- and hydrometallurgy for processing of siderite ores. *Gorniy zhurnal* [Mining Journal]. 2012;(S3):22-24. (In Russ.)
 17. Rudskaya L.V., Kuleshov V.V., Novikova G.I., Kostromina L.P. Ways to reduce losses during complex mining and processing of ferruginous quartzites. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* [Proceedings of the Southwestern State University]. 2013;(3(48)): 228-233. (In Russ.)

References

1. Galyanov A.V., Yakovlev V.L., Gordeev V.A. *Syrevaya baza promyshlennogo kompleksa chernoy metallurgii Rossii* [Raw materials base of Russia's iron and steel industry complex]. Vologda: Infra-Engineering Publishing House LLC, 2022, 340 p. (In Russ.)
2. State Report "On the state and use of mineral resources in the Russian Federation in 2023". 2024, 714 p. (In Russ.)
3. Buzmakov V.N., Volodina Yu.V. Titanomagnetite deposits as a promising raw material base for metallurgy in the Urals (based on the experience of developing the Kachkanar group of deposits). *Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii. Nauchnye chteniya pamyati P.N. Chirvinskogo. Sbornik nauchnykh statei* [Problems of mineralogy, petrography and metallogeny. Scientific readings in memory of P.N. Chirvinsky. Collection of scientific articles]. PGNIU. Perm. 2022, Iss. 25, pp. 27-33 (In Russ.)
4. Kolodezhnaya E.V., Gorlova O.E., Shadrinova I.V., Garkavi M.S., Khardin I.S., Shavakuleva O.P. Prospects for processing the low-grade brown iron ores of the Southern Urals. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025;23(3):5-16. (In Russ.)
5. Yushina T.I., Chanturia E.L., Dumov A.M., Myaskov A.V. Modern trends of technological advancement in iron ore

18. Kuskov V.L., Lvov V.V., Yushina T.I. Increasing the recovery ratio of iron ores in the course of preparation and processing. CIS Iron and Steel Review. 2021;(21):4-8.
19. Ismagilov R.I., Yushina T.I., Dumov A.M. Contrast range examination of rich iron ore from Mikhailovskoe deposit and evaluation of possibility of its preliminary concentration via physical methods. CIS Iron and Steel Review. 2023;26:22-32.
20. Chizhevsky V.B., Sedinkina N.A., Shavakuleva O.P. Study of the main parameters of the magnetic field of a magnetic separation unit in a suspended state. *Nauchnye osnovy i praktika pererabotki rud i tekhnogennogo syr'ya. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Scientific foundations and practice of processing ores and man-made raw materials. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference]. Yekaterinburg: Fort Dialog-Iset, 2008, pp. 63-66. (In Russ.)
21. Chizhevsky V.B., Gorlova O.E., Sedinkina N.A. Influence of the design parameters of the unit on the separation indicators of finely crushed products in a suspended state. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Scientific foundations and practice of processing ores and man-made raw materials. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference]. Yekaterinburg: AMB Publishing House, 2006, pp. 266-270. (In Russ.)
22. Sedinkina N.A., Pavelin A.V., Khisametdinova D.N., Mubaryakov R.S. Factors affecting the process of dry magnetic separation in a suspended state. *Aktualnye problem sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya* [Actual problems of modern science, technology and education]. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2014, vol. 1, pp. 39-42. (In Russ.)
23. Pelevin A.E., Sytykh N.A., Cherepanov D.V. Particle size impact on dry magnetic separation efficiency. *GIAB* [Mining informational and analytical bulletin]. 2021;(11-1):293-305. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_293

Поступила 30.10.2025; принята к публикации 27.01.2026; опубликована 31.03.2026
Submitted 30/10/2025; revised 27/01/2026; published 31/03/2026

Сединкина Наталья Анатольевна – кандидат технических наук,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
E-mail: magnetyt@mail.ru. ORCID0000-0003-0060-8203.

Шавакулева Ольга Петровна – кандидат технических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
E-mail: shavakylevao@yandex.ru. ORCID 0000-0001-6291-2687.

Горлова Ольга Евгеньевна – доктор технических наук, профессор,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия;
ведущий научный сотрудник,
Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия.
E-mail: gorlova_o_e@mail.ru. ORCID 0000-0003-1142-0652.

Панфилова Ольга Рашидовна – кандидат технических наук,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, Магнитогорск, Россия.
E-mail: halikova@inbox.ru. ORCID0000-0001-6395-6948.

Швыдкий Олег Алексеевич – студент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: 2005god.oleg@mail.ru.

Natalya A. Sedinkina – PhD (Eng.),
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
E-mail: magnetyt@mail.ru. ORCID 0000-0003-0060-8203

Olga P. Shavakyleva – PhD (Eng.), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
E-mail: shavakylevao@yandex.ru. ORCID 0000-0001-6291-2687

Olga E. Gorlova – DrSc (Eng.), Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia;
Lead Researcher,
Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia.
E-mail: gorlova_o_e@mail.ru. ORCID 0000-0003-1142-0652.

Olga R. Panfilova – PhD (Eng.),
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
E-mail: halikova@inbox.ru. ORCID 0000-0001-6395-6948.

Oleg A. Shvydkiy – Student,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: 2005god.oleg@mail.ru.

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 676.024.46
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-1-15-21



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КЛАССИФИКАЦИИ ФРАКЦИЙ БЕЛОГО КОРУНДА МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ СЕПАРАЦИИ

Вильмис А.Л., Дробаденко В.П., Дьяченко Е.Н., Некоз К.С., Скрипка А.А., Шалаева А.А.

Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ), Москва, Россия

Аннотация. Проблема классификации порошковых материалов, таких как белый электрокорунд, находит всё большее значение в контексте современных производственных процессов, требующих высокой степени точности и качества. С увеличением требований к качеству этих материалов и их характеристикам возникает необходимость в разработке эффективных и точных методов классификации, способных разделять порошок на фракции с различной насыпной плотностью и размером частиц, что позволит оптимизировать производственные процессы и повысить эффективность конечной продукции. Классификация по насыпной плотности важна не только для достижения оптимальных эксплуатационных свойств готовой продукции, но и для повышения рентабельности процесса за счет уменьшения отходов и улучшения управляемости сырьевых потоков. Целью работы является исследование возможности классификации порошка белого электрокорунда на лабораторном электростатическом сепараторе по фракциям, отличающимся насыпной плотностью. Для проведения процесса электростатической сепарации применялся сепаратор электростатический барабанного типа ЭЛКОР-1. Новизна экспериментального исследования состоит в проведении анализа с измененной насыпной плотностью и изменяемыми условиями проведения анализа (ток, напряжение, выключение/включение нагрева сепаратора, положение электродов, скорость вращения барабанов) для определения параметров разделения белого корунда на фракции F120 и F60. В результате определены наиболее целесообразные условия для проведения сепарации и получения наименьших значений насыпной плотности для фракции F120 (класс крупности $-0,125+0,106$ мм) и фракции F60 (класс крупности $-0,3+0,25$ мм). Изученные нами закономерности электростатической сепарации белого корунда позволяют оптимизировать выбор технологических методов обогащения, исключая энергозатратные и малоэффективные процессы для фракции F60 ($-0,3+0,25$ мм).

Ключевые слова: дробление, гранулометрический анализ, насыпная плотность, электрокорунд, электростатическая сепарация, зернистость

© Вильмис А.Л., Дробаденко В.П., Дьяченко Е.Н., Некоз К.С., Скрипка А.А., Шалаева А.А., 2026

Для цитирования

Экспериментальное исследование классификации фракций белого корунда методом электростатической сепарации / Вильмис А.Л., Дробаденко В.П., Дьяченко Е.Н., Некоз К.С., Скрипка А.А., Шалаева А.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №1. С. 15-21 <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-15-21>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE CLASSIFICATION OF WHITE FUSED ALUMINA FRACTIONS BY ELECTROSTATIC SEPARATION

Vilmis A.L., Drobadenko V.P., Dyachenko E.N., Nekoz K.S., Skripka A.A., Shalaeva A.A.

Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia

Abstract. The classification of powder materials, such as white fused alumina, is gaining increasing importance in modern manufacturing processes that demand high precision and quality standards. As requirements for material quality and characteristics become more stringent, there is a growing need to develop efficient and precise classification methods capable of separating powder into fractions with different bulk densities which will optimize production processes and increase the efficiency of the final product. Bulk density classification is crucial not only for achieving optimal performance characteristics of the final product but also for enhancing process profitability through waste reduction and improved raw material flow management. The objective of this study is to investigate the feasibility of classifying white fused alumina powder into fractions with distinct bulk densities using a laboratory-scale electrostatic separator. The experiments have employed an ELKOR-1 drum-type electrostatic separator. The novelty of this experimental research lies in conducting analysis with modified bulk density and variable process parameters (current, voltage, heater activation/deactivation, electrode positioning, drum rotation speed) to determine optimal separation conditions for F120 and F60 white fused alumina fractions. The study has identified the most appropriate operating parameters for achieving separation and obtaining minimal bulk density values for the F120 fraction (particle size $-0.125+0.106$ mm) and F60 fraction (particle size $-0.3+0.25$ mm). The researched patterns of white fused alumina electrostatic separation allow for optimization of enrichment method selection, particularly by eliminating energy-intensive and inefficient processes for the F60 fraction ($-0.3+0.25$ mm).

Keywords: crushing, granulometric analysis, bulk density, fused alumina, electrostatic separation, granularity

For citation

Vilmis A.L., Drobadenko V.P., Dyachenko E.N., Nekoz K.S., Skripka A.A., Shalaeva A.A. Experimental Study of the Classification of White Fused Alumina Fractions by Electrostatic Separation. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 1, pp. 15-21. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-15-21>

Введение

Белый корунд (α - Al_2O_3) является одним из ключевых абразивных материалов, широко применяемых в металлообработке, производстве керамики и высокопрочных композитов [1]. Важнейшей характеристикой, определяющей его эксплуатационные свойства, является гранулометрический состав, который напрямую влияет на такие параметры, как насыпная плотность, абразивная способность и однородность структуры [2]. Традиционные методы классификации (просеивание, воздушная сепарация) не всегда обеспечивают требуемую точность разделения, особенно для тонких фракций ($-0,3+0,1$ мм), что обусловлено высокой адгезией частиц и их склонностью к агрегации [3].

Электростатическая сепарация представляет собой перспективный метод разделения минеральных частиц, основанный на различиях в их электропроводности, диэлектрической проницаемости и способности к трибоэлектризации [4]. Физическая суть процесса электросепарации – разделение частиц в электрическом поле по величине и знаку заряда, созданного на частицах в зависимости от электрических свойств и размеров. В отличие от механических способов, этот метод позволяет эффективно разделять частицы с близкими размерами, но разными физико-химическими свойствами, что особенно актуально для корундовых порошков [5]. Однако его применение

для классификации белого корунда изучено недостаточно, особенно в контексте влияния параметров процесса (напряжённость поля, влажность, скорость подачи материала) на эффективность разделения [6].

Целью данной работы является исследование возможности классификации порошка белого электрокорунда на лабораторном электростатическом сепараторе по фракциям, отличающимся насыпной плотностью.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Выбор режимов электростатической сепарации, обеспечивающих возможность классификации исследуемых материалов по фракциям, отличающимся насыпной плотностью.
2. Проведение лабораторных испытаний сепарации при выбранных режимах на двух материалах: материалы белого электрокорунда зернистости F60 и F120.
3. Определение массового выхода, насыпной плотности и гранулометрического состава фракций после сепарации.
4. Анализ результатов исследований.

Материалы и методы исследования

Классификация материалов по насыпной плотности позволяет лучше управлять сырьевыми потоками, минимизировать отходы и повышать выход ценных продук-

тов, поэтому были изучены условия процесса электрической сепарации белого электрокорунда для получения материалов с меньшей насыпной плотностью относительно насыпной плотности исходного материала.

В качестве исходного сырья использовали продукты размолва белого электрокорунда зернистости F60 (класс крупности $-0,3+0,25$ мм) и F120 (класс крупности $-0,125+0,106$ мм) (стандарт FEPA).

При определении насыпной плотности материалов руководствовались ГОСТ 28924-91 «Методы определения физических и физико-механических свойств». Пределы (\pm) допускаемых значений погрешности измерений насыпной плотности при доверительной вероятности $=0,95$ не должны превышать $0,02$ г/см³. Метод измерения насыпной плотности основан на свободном насыпании материала через соответствующую воронку в мерный цилиндр определенного объема до полного заполнения и определения массы материала в цилиндре с последующим расчетом величины.

Вместимость цилиндра с округлением до третьей значащей цифры вычисляли по формуле

$$V = \frac{m_0}{\rho_{H_2O}}, \quad (1)$$

где V – вместимость цилиндра, см³; m_0 – масса воды, г ($m_0 = m_2 - m_1$, где m_1 – масса цилиндра, высушенного и взвешенного вместе со стеклянной пластинкой, г; m_2 – масса цилиндра вместе с водой и стеклянной пластинкой, г); ρ_{H_2O} – плотность воды, г/см³, при температуре определения, °С (температура определения 23°С, плотность воды 0,9975 г/см³). За вместимость цилиндра приняли среднее арифметическое значение, полученное по результатам трех измерений: $V = 196$ мл.

Насыпную (объемную) плотность X_2 вычисляли по формуле

$$X_2 = \frac{m}{V}, \quad (2)$$

где m – масса материала в мерном цилиндре, г; V – объем цилиндра, см³.

За окончательный результат принимаем среднее арифметическое значение трех параллельных определений. Разница результатов параллельных определений (dg) не должна превышать $0,02$ г/см³. При получении результатов более допускаемых значений размаха проводили повторное определение, при этом результаты повторного определения считали окончательными.

Полученные результаты и их обсуждение

Для белого корунда фракции F120 (класс крупности $-0,125+0,106$ мм) было проведено 9 экспериментов с измененными условиями: изменялись показатели тока с 0,01 до 0,12 мА, напряжение варьировалось от 12 до 25 кВ, скорость вращения барабанов составляла от 90 до 200 об/мин, эксперимент осу-

ществлялся как без нагрева, так и с нагревом до 80°С, также было изменено положение электродов.

Эксперимент №1 был проведен при следующих условиях: ток 0,12 мА; напряжение 24 кВ; скорость вращения барабана 180 об/мин; нагрев до 85°С; положение электродов: 10, 40, 70°; высота 6 см (рис. 1, табл. 1).

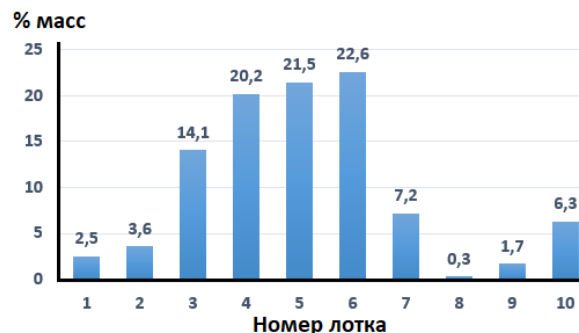


Рис. 1. Результаты сепарации (эксперимент №1)
Fig. 1. Separation results (experiment No. 1)

Таблица 1. Результаты определения насыпной плотности (эксперимент №1)
Table 1. Results of bulk density determination (experiment No. 1)

| Наименование пробы | Масса пробы, г | Насыпная плотность, г/см ³ | Средняя насыпная плотность, г/см ³ |
|--------------------|----------------|---------------------------------------|---|
| Исходная проба | 325,10 | 1,66 | 1,66 |
| | 325,67 | 1,66 | |
| | 325,65 | 1,66 | |
| Лоток 3 | 328,80 | 1,68 | 1,68 |
| | 328,33 | 1,68 | |
| | 328,70 | 1,68 | |
| Лоток 4 | 329,26 | 1,68 | 1,68 |
| | 328,20 | 1,67 | |
| | 329,30 | 1,68 | |
| Лоток 5 | 331,51 | 1,69 | 1,68 |
| | 329,17 | 1,68 | |
| | 329,91 | 1,68 | |
| Лоток 6 | 329,61 | 1,68 | 1,69 |
| | 331,48 | 1,69 | |
| | 331,82 | 1,69 | |
| Лотки 1-3 | 322,10 | 1,64 | 1,64 |
| | 322,23 | 1,64 | |
| | 322,41 | 1,64 | |
| Лотки 1-4 | 327,72 | 1,67 | 1,67 |
| | 327,59 | 1,67 | |
| | 327,69 | 1,67 | |
| Лотки 1-5 | 328,96 | 1,68 | 1,68 |
| | 328,65 | 1,68 | |
| | 328,97 | 1,68 | |
| Лотки 8-10 | 313,05 | 1,60 | 1,59 |
| | 311,95 | 1,59 | |
| | 312,21 | 1,59 | |
| Лотки 6-10 | 326,97 | 1,67 | 1,67 |
| | 326,27 | 1,66 | |
| | 326,55 | 1,67 | |

Потери материала в процессе сепарации составили 55,37 г (1,4%). Насыпная плотность была измерена

для следующих продуктов: исходный материал; материал лотка 3; материал лотка 4; материал лотка 5.

После процесса электростатической сепарации наблюдается уменьшение насыпной плотности (относительно насыпной плотности исходного материала) при соединении материалов из лотков 1-3 и 8-10.

При этом наименьшие значения насыпной плотности были получены в результате эксперимента №2 со следующими условиями: ток 0,07 мА; напряжение 25 кВ; скорость вращения барабана 158 об/мин, без нагрева; положение электродов: 30, 55, 70°; высота 8 см. Полученные значения после сепарации и результаты определения насыпной плотности приведены на рис. 2 и в табл. 2.

Потери материала в процессе сепарации составили 121,34 г (4,07%).

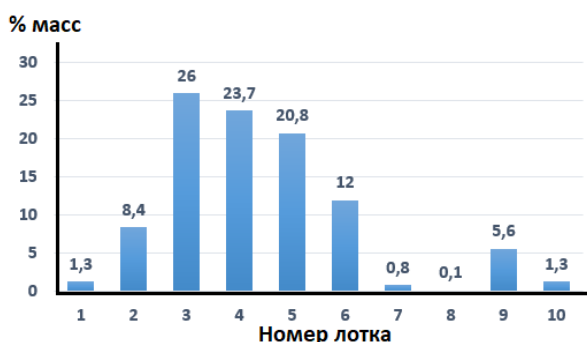


Рис. 2. Результаты сепарации (эксперимент №2)
Fig. 2. Separation result (experiment No. 2)

Таблица 2. Результаты определения насыпной плотности (эксперимент №2)
Table 2. Results of bulk density determination (experiment No. 2)

| Наименование пробы | Масса пробы, г | Насыпная плотность, г/см ³ | Средняя насыпная плотность, г/см ³ |
|--------------------|----------------|---------------------------------------|---|
| Лоток 3 | 336,48 | 1,72 | 1,72 |
| | 336,51 | 1,72 | |
| | 336,34 | 1,72 | |
| Лоток 4 | 336,25 | 1,72 | 1,72 |
| | 336,80 | 1,72 | |
| | 336,11 | 1,72 | |
| Лоток 6 | 311,19 | 1,59 | 1,59 |
| | 310,00 | 1,58 | |
| | 312,00 | 1,59 | |
| Лотки 6-10 | 310,87 | 1,59 | 1,59 |
| | 312,00 | 1,59 | |
| | 310,94 | 1,59 | |
| Лотки 5-10 | 318,84 | 1,63 | 1,63 |
| | 317,96 | 1,62 | |
| | 318,90 | 1,63 | |

Насыпная плотность была измерена для следующих продуктов: материал лотка 3; материал лотка 4; материал лотка 5; материал лотка 6. Насыпная плотность материалов остальных лотков не определялась ввиду недостаточного объема материала (ГОСТ 28924-91).

После процесса электростатической сепарации наблюдается значительное уменьшение насыпной плотности в лотке 6. Для увеличения массы фракции с меньшей насыпной плотностью нами были смешаны фракции из лотков 6-10, насыпная плотность смешанного материала сопоставима с насыпной плотностью материала из лотка 6. Масса материалов из лотков 6-10 равна 591,62 г, что составляет 19,9% от массы исходной пробы. При добавлении к смешанному материалу фракции лотка 5 насыпная плотность увеличилась.

Для белого корунда фракции F60 (класс крупности -0,3+0,25 мм) было проведено 6 экспериментов с различными условиями: изменение скорости вращения барабана, высоты подъема и углов наклона электродов), наименьшие значения насыпной плотности (1,75 г/см³ при насыпной плотности исходного материала 1,80 г/см³) для фракции F60 (класс крупности -0,3+0,25 мм) были получены в результате эксперимента №3 при следующих условиях (рис. 3, табл. 3): ток 0,07 мА; напряжение 22 кВ; скорость вращения барабана 150 об/мин; без нагрева; положение электродов: 30, 55, 75°; высота 8 см.

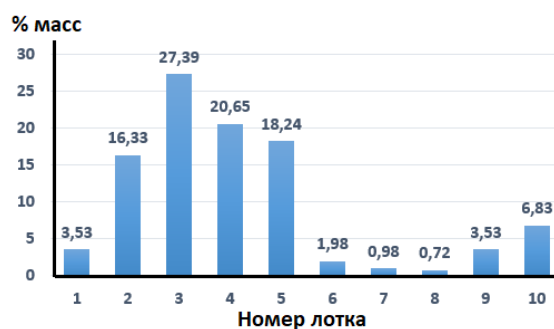


Рис. 3. Результаты сепарации (эксперимент №3)
Fig. 3. Separation results (experiment No. 3)

Таблица 3. Результаты определения насыпной плотности (эксперимент №3)
Table 3. Results of bulk density determination (experiment No. 3)

| Наименование пробы | Масса пробы, г | Насыпная плотность, г/см ³ | Средняя насыпная плотность, г/см ³ |
|--------------------|----------------|---------------------------------------|---|
| Лоток 2 | 347,70 | 1,77 | 1,77 |
| | 347,92 | 1,78 | |
| | 347,83 | 1,77 | |
| Лоток 3 | 363,72 | 1,86 | 1,85 |
| | 362,78 | 1,85 | |
| | 362,98 | 1,85 | |
| Лоток 4 | 359,45 | 1,83 | 1,83 |
| | 359,45 | 1,83 | |
| | 359,18 | 1,83 | |
| Лоток 5 | 358,51 | 1,83 | 1,83 |
| | 357,19 | 1,82 | |
| | 357,74 | 1,83 | |
| Лотки 6-10 | 342,74 | 1,75 | 1,75 |
| | 342,53 | 1,75 | |
| | 342,50 | 1,75 | |

Потери материала в процессе сепарации составили 110,0 г (2,82%).

Насыпная плотность была измерена для следующих продуктов: материал лотка 2; материал лотка 3; материал лотка 4; материал лотка 5.

После процесса электростатической сепарации наблюдается уменьшение насыпной плотности при смешении материалов лотков 6-10 относительно насыпной плотности исходного материала. Но масса материалов лотков 6-10 равна 525,27 г, что составляет 14% от массы исходного материала (низкий выход фракции с меньшей насыпной плотностью).

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод о нецелесообразности применения процесса электрической сепарации для получения фракции с насыпной плотностью меньше насыпной плотности исходного материала для фракции F60 (класс крупности -0,3+0,25 мм).

Подытоживая исследования, необходимо отметить, что различные марки электрокорунда, от F4 (фракция 4750–5600 мкм) до F220 (фракция 5–75 мкм), определяются только их фракционным составом. В настоящее время отечественная промышленность предъявляет требования не только к фракционному составу, но и к насыпной плотности электрокорунда. Вне зависимости от марки и фракционного состава насыпная плотность различных марок электрокорунда варьируется в пределах от 1,58 до 1,82 г/см³. При этом если разделить фракции по размеру частиц методом ситового анализа не представляет трудности, то чёткий контроль насыпной плотности удаётся регулировать только методами электростатической сепарации. Физическая суть разделения исходной пробы порошкового материала на фракции по насыпной плотности в процессе электростатической сепарации заключается в более тонкой сепарации по размерам частиц, приводя к более плотноупакованной структуре насыпного материала. Морфологические свойства порошков после электростатической сепарации на различных лотках требуют дальнейшего детального изучения. Настоящая работа представляет результаты исследований глубокого тонкого фракционирования электрокорунда по насыпной плотности методом электромагнитной сепарации.

Впервые удалось найти режимы для фракционирования электрокорунда марки F60 и F120 и провести разделение партии на два продукта с плотностью 1,66 и 1,82 г/см³ (табл. 4).

Экспериментально определённые параметры значений тока, напряжения, скорости вращения барабана, углов положения электродов, высоты электродов

позволяют использовать полученные на лабораторном сепараторе данные для тонкой настройки промышленного оборудования на предприятиях-производителях белого электрокорунда.

Заключение

Классификация материалов по насыпной плотности играет ключевую роль в современном производстве, поскольку позволяет не только оптимизировать эксплуатационные характеристики конечной продукции, но и существенно повысить экономическую эффективность технологических процессов. Как отмечают исследования, данный подход обеспечивает: улучшение качества продукции за счет получения фракций с заданными физическими свойствами, что особенно важно для абразивных материалов и керамических композитов, снижение производственных затрат за счет минимизации потерь сырья (до 15–20%), оптимизации логистики и хранения материалов и сокращения энергопотребления на последующих стадиях переработки.

В ходе исследования экспериментально подтверждена целесообразность применения электростатической сепарации для классификации белого корунда фракции F120 (-0,125+0,106 мм). Оптимальные параметры процесса: напряжение 25 кВ; ток 0,07 мА; скорость вращения барабана 158 об/мин; конфигурация электродов 30, 55, 70° на высоте 8 см. Достигнуто снижение насыпной плотности с 1,72 до 1,59 г/см³ при выходе целевой фракции 19,9% (лотки 6–10). Результаты согласуются с данными исследований [7], где подчеркивается роль напряжения и геометрии электродов в эффективности разделения.

Были получены ограничения метода для белого корунда фракции F60 из-за невысоких показателей: минимальное снижение насыпной плотности (1,80 → 1,75 г/см³), низкий выход целевой фракции (14%). Это обусловлено крупностью частиц, снижающей их подвижность в электростатическом поле, что подтверждается работами [7], где отмечается зависимость эффективности сепарации от granulометрического состава.

Критическими параметрами процесса электростатической сепарации стали напряжение (значения выше 20 кВ улучшают разделение, но требуют контроля для избегания пробоя) и влажность – отсутствие нагрева (как в наших экспериментах) минимизирует агрегацию частиц, что критично для тонких фракций [8].

Таблица 4. Режимы фракционирования на электростатическом сепараторе

Table 4. Fractionation modes on an electrostatic separator

| Эксперимент | Ток, мА | Напряжение, кВ | Скорость барабана, об/мин | Положение электродов, град | Высота, см | Средняя плотность 90% фракции, г/см ³ |
|-------------|---------|----------------|---------------------------|----------------------------|------------|--|
| 1 | 0,12 | 25 | 180 | 10, 40, 70 | 6 | 1,66 |
| 2 | 0,07 | 25 | 158 | 30, 55, 70 | 8 | 1,67 |
| 3 | 0,07 | 22 | 150 | 30, 55, 70 | 8 | 1,82 |

Также отметим, для белого электрокорунда фракции F120 внедрение электросепарации в производство позволяет снизить отходы (4,07% потерь) и повысить однородность продукта.

Перспективным является изучение гибридных методов (например, трибоэлектризация + аэросепарация) для фракций крупнее 0,25 мм, а также оптимизация параметров для промышленных масштабов [9, 10].

В условиях ужесточающейся международной конкуренции и глобализации производственных цепочек внедрение таких инновационных методов классификации становится стратегической необходимостью. Как показывают исследования, предприятия, использующие современные технологии сепарации, демонстрируют на 25–30% более высокие показатели рентабельности по сравнению с традиционными подходами.

Список источников

1. Кузьмин В.И., Кармазин В.В. Современные технологии производства белого корунда // Огнеупоры и техническая керамика. 2020. № 5. С. 34–40. DOI: 10.17073/1683-4518-2020-5-34-40.
2. Medles K., Tilmatine A., Dascalescu L. Optimization of electrostatic separation process for granular materials using response surface methodology // IEEE Transactions on Industry Applications. 2019, vol. 55, pp. 3071–3078. DOI: 10.1109/TIA.2019.2899263.
3. Zhou Y., Zhang H., Wang Y. Experimental study on the electrostatic beneficiation of white fused alumina // Powder Technology. 2023, vol. 415, pp. 118167. DOI: 10.1016/j.powtec.2022.118167.
4. Иванов А.А., Петров В.Г. Электростатическая сепарация минеральных частиц: теория и практика // Обогащение руд. 2021. № 3. С. 45–50. DOI: 10.17580/or.2021.03.07.
5. Кузнецова Е.Д., Малышев О.Н. Электростатическое разделение частиц корунда в зависимости от их гранулометрического состава // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 5. С. 78–85. eLibrary.ru.
6. Fedorov D.E., Vlasov A.A. Применение комбинированных методов сепарации для повышения качества белого корунда // Химическая технология. 2023. № 2. С. 55–62. DOI: 10.31044/1684-5811-2023-24-2-55-62.
7. Иванов А.А., Петров В.Г. Электростатическая сепарация минеральных частиц: теория и практика // Обогащение руд. 2021. № 3. С. 45–50. DOI: 10.17580/or.2021.03.07
8. Electrostatic beneficiation of white fused alumina / Zhou Y. et al. // Powder Technol. 2023, vol. 415, 118167. DOI: 10.1016/j.powtec.2022.118167
9. Кузьмин В.И., Кармазин В.В. Современные технологии производства корунда // Огнеупоры и техническая керамика. 2020. № 5. С. 34–40. DOI: 10.17073/1683-4518-2020-5-34-40
10. Авдохин В.М. Основы обогащения полезных ископаемых : учебник : в 2 т. 4-е изд., стер. Москва: Горная книга, 2018. Том 1 : Обогачительные процессы. 2018. 420 с. ISBN 978-5-98672-473-7.

References

1. Kuzmin V.I., Karamzin V.V. Modern technologies for white fused alumina production. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika* [Refractories and Technical Ceramics]. 2020;(5):34-40. DOI: 10.17073/1683-4518-2020-5-34-40. (In Russ.)
2. Medles K., Tilmatine A., Dascalescu L. Optimization of electrostatic separation process for granular materials using response surface methodology. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2019;55:3071-3078. DOI: 10.1109/TIA.2019.2899263.
3. Zhou Y., Zhang H., Wang Y. Experimental study on the electrostatic beneficiation of white fused alumina. *Powder Technology*. 2023;415. Article 118167. DOI: 10.1016/j.powtec.2022.118167.
4. Ivanov A.A., Petrov V.G. Electrostatic separation of mineral particles: Theory and practice. *Obogashchenie rud* [Mineral Processing]. 2021;(3):45-50. DOI: 10.17580/or.2021.03.07. (In Russ.)
5. Kuznetsova E.D., Malyshev O.N. Electrostatic separation of corundum particles depending on their granulometric composition. *Gorniy informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin]. 2020;(5):78-85. Available at: eLibrary.ru (In Russ.)
6. Fedorov D.E., Vlasov A.A. Application of combined separation methods for improving white fused alumina quality. *Khimicheskaya tekhnologiya* [Chemical Technology]. 2023;(2):55-62. DOI: 10.31044/1684-5811-2023-24-2-55-62. (In Russ.)
7. Ivanov A.A., Petrov V.G. Electrostatic separation of mineral particles: Theory and practice. *Obogashchenie rud* [Mineral Processing]. 2021;(3):45-50. DOI: 10.17580/or.2021.03.07. (In Russ.)
8. Zhou Y., Zhang H., Wang Y. Electrostatic beneficiation of white fused alumina. *Powder Technology*. 2023;415. Article 118167. DOI: 10.1016/j.powtec.2022.118167.
9. Kuzmin V.I., Karamzin V.V. Modern technologies for corundum production. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika* [Refractories and Technical Ceramics]. 2020;(5):34-40. DOI: 10.17073/1683-4518-2020-5-34-40. (In Russ.)
10. Avdokhin V.M. *Osnovy obogashcheniya poleznykh iskopaemykh: uchebnik* [Fundamentals of mineral processing: textbook]. In 2 volumes, 4th ed. Moscow : Gornaya kniga, 2018. Vol. 1. 420 p. ISBN 978-5-98672-473-7. (In Russ.)

Поступила 19.05.2025; принята к публикации 31.05.2025; опубликована 31.03.2026
Submitted 19/05/2025; revised 31/05/2025; published 31/03/2026

Вильмис Александр Леонидович – доктор технических наук, заведующий кафедрой геотехнологических способов и физических процессов горного производства, Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ), Москва, Россия.
Email: vilmisal@mgru.ru. ORCID 0009-0002-4057-0967

Дьяченко Елена Николаевна – кандидат химических наук, доцент,
Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ),
Москва, Россия.

Email: dyachenkoen@mgri.ru. ORCID 0009-0004-5372-0244

Дробаденко Валерий Павлович – профессор, доктор технических наук,
Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ),
Москва, Россия.

Email: drobadenkovp@mgri.ru

Некоз Ксения Сергеевна – кандидат технических наук, доцент,
Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ),
Москва, Россия.

Email: nekozksy@mail.ru.

Скрипка Анри Анривич – ведущий специалист департамента науки и технологий,
Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ),
Москва, Россия.

Email: skripkaaa@mgri.ru

Шалаева Анастасия Александровна – студент, делопроизводитель на кафедре геотехнологических
способов и физических процессов горного производства,
Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ),
Москва, Россия.

Email: anastasiashalaeva08@yandex.ru ORCID 0000-0002-8891-7686

Alexander L. Vilmis – DrSc (Eng.), Head of the Department of Geotechnological Methods
and Physical Processes of Mining,

Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia.

Email: vilmisal@mgri.ru. ORCID 0009-0002-4057-0967

Elena N. Dyachenko – PhD (Eng.), Associate Professor,
Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia.

Email: dyachenkoen@mgri.ru. ORCID 0009-0004-5372-0244

Valery P. Drobadenko – DrSc (Eng.), Professor,
Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia.

Email: drobadenkovp@mgri.ru

Kseniya S. Nekoz – PhD (Eng.), Associate Professor,
Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia.

Email: nekozksy@mail.ru

Anri A. Scripka – Leading Specialist of the Department of Science and Technology,
Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia.

Email: skripkaaa@mgri.ru

Anastasia A. Shalaeva – Student, chief clerk at the Department of Geotechnological Methods
and Physical Processes of Mining,

Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia.

Email: anastasiashalaeva08@yandex.ru ORCID 0000-0002-8891-7686



ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ МОЩНОСТИ РУДНИКА НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА КОМПЛЕКСА САМОХОДНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Антипин Ю.Г., Никитин И.В.

Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

Аннотация. **Актуальность работы.** В условиях пологих месторождений производственная мощность рудника по горным возможностям зависит от величины рабочей горизонтальной рудной площади, применяемой системы разработки, производительности добычного блока, площади блока и их количества в одновременной отработке. Производительность блока определяется эксплуатационной производительностью комплекса самоходного оборудования на очистной выемке и транспортировании руды, состоящего из погрузо-доставочной машины и автосамосвала. Выбор состава комплекса самоходного оборудования обычно осуществляется исходя из практики передовых предприятий в аналогичных условиях или на основе технико-экономического сравнения по производительности машин в зависимости от длины доставки или их стоимости без учета размеров блока и оценки эффективности использования машин в течение года. **Цель работы.** Разработка и апробация методики определения оптимальной производственной мощности рудника на основе оценки эффективности и выбора оптимального состава комплекса самоходного оборудования на очистной выемке и транспортировании руды в зависимости от мощности залежи. **Используемые методы.** Использован комплексный метод исследований, включающий анализ оценочных показателей эффективности комплексов самоходного оборудования, экономико-математическое моделирование и графоаналитический метод. **Результаты.** Разработана методика оценки эффективности и выбора оптимального состава комплекса самоходного оборудования, отличающаяся учетом размеров блока, сечений подготовительно-нарезных и транспортных выработок, фактической грузоподъемности и рабочего количества погрузо-доставочных машин и автосамосвалов, необходимых для обеспечения годового объема добычи. С использованием предложенной методики установлены оптимальный состав комплекса самоходного оборудования и величина годовой производственной мощности рудника, обеспечиваемая данным комплексом, в зависимости от мощности залежи, изменяющейся от 10 до 25 м. **Выводы.** Установлено, что эффективность работы комплекса самоходного оборудования зависит от соответствия параметров машин горно-геологическим и горнотехническим условиям разработки.

Ключевые слова: пологое месторождение, комбинированная система разработки, погрузо-доставочная машина, шахтный автосамосвал, мощность залежи, грузоподъемность, удельные эксплуатационные затраты

Исследования выполнены в рамках Госзадания № 075-00410-25-00. Тема 1 (2025-2027). Методология обоснования перспектив технологического развития комплексного освоения минерально-сырьевых ресурсов твердых полезных ископаемых России (FUWE-2025-0001), № гос. рег. 125070908257-0.

© Антипин Ю.Г., Никитин И.В., 2026

Для цитирования

Антипин Ю.Г., Никитин И.В. Оптимизация производственной мощности рудника на основе оценки эффективности и выбора оптимального состава комплекса самоходного оборудования // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №1. С. 22-31. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-22-31>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

OPTIMIZATION OF MINE PRODUCTION CAPACITY BASED ON THE EFFICIENCY EVALUATION AND SELECTION OF THE OPTIMAL COMPOSITION OF A SELF-PROPELLED EQUIPMENT COMPLEX

Antipin Yu.G., Nikitin I.V.

Institute of Mining of the Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

Abstract. Relevance. In the case of shallow deposits, the production capacity of a mine, from the perspective of mining potential, depends on the size of the working horizontal ore area, the mining method employed, the productivity of the extraction unit, the unit area, and their number mined simultaneously. The productivity of a unit is determined by the operational performance of the self-propelled equipment complex used for ore stoping and transportation, which typically consists of a load-haul-dump machine and a dump truck. The selection of the composition of the self-propelled equipment complex is usually based on the practices of leading enterprises under similar conditions or on the basis of a technical and economic comparison of machine productivity depending on haul distance or cost, without taking into account the unit dimensions or evaluating the efficiency of machine utilization over the course of a year. **Objectives.** The research is aimed at developing and testing a methodology for determining the optimal mine production capacity based on efficiency assessment and selection of the optimal complex composition of self-propelled equipment for ore stoping and transportation depending on the deposit thickness. **Methods Applied.** Comprehensive research method has been used, including the analysis of estimated performance indicators of self-propelled equipment complexes, economic and mathematical modeling and graphoanalytical method. **Results.** A methodology for evaluating efficiency and selecting the optimal composition of a self-propelled equipment complex has been developed. The proposed methodology differs in that it takes into account the unit dimensions, the cross-sections of development and haulage workings, the actual load capacity and the operating number of load-haul-dump machines and dump trucks required to ensure annual production volume. Using the proposed methodology, the optimal composition of the self-propelled equipment complex and the annual production capacity of the mine provided by this equipment complex have been determined, depending on the deposit thickness, varying from 10 to 25 m. **Conclusions.** It has been established that the efficiency of the self-propelled equipment complex depends on the correspondence between machine parameters and the mining-geological and mining-technical conditions of operation.

Keywords: shallow deposit, combined mining method, load-haul-dump machine, mine dump truck, deposit thickness, load capacity, unit operating costs

The research was carried out within the framework of State Assignment No. 075-00410-25-00. Theme 1 (2025-2027). Methodology for substantiation the prospects of technological development of the integrated development of mineral resources of solid minerals in Russia (FUWE-2025-0001), state registration No. 125070908257-0.

For citation

Antipin Yu.G., Nikitin I.V. Optimization of Mine Production Capacity Based on the Efficiency Evaluation and Selection of the Optimal Composition of a Self-Propelled Equipment Complex. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 1, pp. 22-31. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-22-31>

Введение

Методология обоснования геотехнологической стратегии освоения пологих месторождений средней мощности на основе применения комбинированной системы разработки (КСР), обеспечивающей кардинальное повышение полноты и качества извлечения запасов из недр [1-4], включает решение задачи оптимизации величины годовой производственной мощности подземного рудника с учетом комплексной механизации процессов добычи руды с применением самоходного оборудования.

В теории проектирования горных предприятий сложились понятия о производственной мощности

рудника по горным возможностям и оптимальной по экономическим соображениям [5]. Первый термин характеризует принципиально достижимый годовой объем добычи, который может быть обеспечен рудником при определенных технологиях, средствах механизации и организации горных работ. Второй термин определяет годовой объем добычи, при котором обеспечиваются наилучшие экономические показатели работы рудника в соответствии с принятым критерием эффективности. Оптимизация производственной мощности осуществляется всегда в пределах горных возможностей.

В условиях пологих месторождений производственная мощность рудника по горным возможно-

стям зависит от величины рабочей горизонтальной рудной площади, применяемой системы разработки, производительности добычного блока, площади блока и их количества в одновременной отработке [6, 7]. В свою очередь, производительность блока при комплексной механизации добычных работ с применением самоходного оборудования определяется сменной эксплуатационной производительностью комплекса самоходного оборудования (КСО) на очистной выемке и транспортировании руды, состоящего из погрузо-доставочной машины (ПДМ) и шахтного автосамосвала (ШАС) [8-12].

Таким образом, при одинаковых рабочей рудной площади и системе разработки основными факторами, влияющими на величину производственной мощности рудника, являются площадь блока и состав КСО, характеризуемый грузоподъемностью ПДМ и ШАС и их количеством. Выбор состава КСО обычно осуществляется исходя из практики передовых предприятий в аналогичных условиях или на основе технико-экономического сравнения по производительности машин в зависимости от длины доставки или их стоимости [13-16] без учета размеров блока и оценки эффективности использования машин в течение года. Необходимость совершенствования методических положений выбора оптимального состава КСО при выемке пологих залежей средней мощности КСР обуславливает актуальность настоящего исследования.

Целью исследования является разработка и апробация методики определения оптимальной производственной мощности рудника на основе оценки эффективности и выбора оптимального состава КСО на очистной выемке и транспортировании руды в зависимости от мощности залежи.

Методика исследования

При оценке эффективности и выборе КСО следует учитывать не только затраты, непосредственно связанные с эксплуатацией ПДМ и ШАС, но и затраты на проведение выработок, необходимых для обеспечения работы и перемещения ПДМ и ШАС. В качестве критерия эффективности КСО принят минимум суммарных удельных эксплуатационных затрат на выпуск и доставку руды из блока до рудоспуска с помощью ПДМ, транспортирование руды от рудоспуска до скипового ствола с помощью ШАС, проходку подготовительно-нарезных выработок (ПНВ) в блоке и транспортных выработок (ТВ) вне блока и амортизацию оборудования.

На основе методических положений по расчету самоходного транспорта [17, 18] разработана методика определения оптимальной производственной мощности рудника на основе оценки эффективности и выбора оптимального состава КСО на очистной выемке и транспортировании руды при КСР пологих залежей средней мощности. Новизна методики состоит в учете размеров блока, зависящих от мощности залежи, сечений ПНВ и ТВ, определяемых габари-

ритами размещаемых в них машин, фактической грузоподъемности, определяемой емкостью ковша ПДМ или вместимостью кузова ШАС, и рабочего количества машин, необходимых для обеспечения годового объема добычи.

Методика состоит в последовательном выполнении 10-ти этапов:

1. Расчет эксплуатационных запасов блока $Q_{\text{экс}}$, тыс. т, исходя из размеров блока с учетом мощности залежи и показателей извлечения руды [19]:

$$Q_{\text{экс}} = \frac{m_{\text{рт}} L_{\text{бл}} (B_{\text{к}} + B_{\text{мкц}}) \gamma_{\text{р}} (1 - \Pi)}{1000 \cos \alpha_{\text{рт}} (1 - P)}, \quad (1)$$

где $m_{\text{рт}}$ – мощность залежи, м; $L_{\text{бл}}$ – длина блока, м; $B_{\text{к}}$, $B_{\text{мкц}}$ – ширина камеры и МКЦ, м; $\gamma_{\text{р}}$ – плотность руды в массиве, т/м³; $\alpha_{\text{рт}}$ – угол падения залежи, град; Π , P – коэффициенты, учитывающие потери и разубоживание руды, доли ед.

2. Расчет сменной эксплуатационной производительности на выпуске и доставке руды ПДМ $P_{\text{см}}^{\text{пдм}}$ и транспортировании руды ШАС $P_{\text{см}}^{\text{шас}}$, т/смену, [9, 17] с учетом их грузоподъемности:

$$P_{\text{см}}^{\text{пдм}} = \frac{60 T_{\text{см}} V_{\text{ков}}^{\text{пдм}} k_{\text{зап}} \gamma_{\text{р}} k_{\text{исп}}}{T_{\text{р}}^{\text{пдм}} k_{\text{р}} k_{\text{нер}}}, \quad (2)$$

$$P_{\text{см}}^{\text{шас}} = \frac{60 T_{\text{см}} V_{\text{куз}}^{\text{шас}} k_{\text{зап}} \gamma_{\text{р}} k_{\text{исп}}}{T_{\text{р}}^{\text{шас}} k_{\text{р}} k_{\text{нер}}}, \quad (3)$$

где $T_{\text{см}}$ – продолжительность смены, ч; $V_{\text{ков}}^{\text{пдм}}$, $V_{\text{куз}}^{\text{шас}}$ – объем ковша ПДМ или емкость кузова ШАС, м³; $k_{\text{зап}}$ – коэффициент заполнения ковша ПДМ или кузова ШАС по объему; $k_{\text{исп}}$ – коэффициент внутрисменного использования машины; $T_{\text{р}}^{\text{пдм}}$, $T_{\text{р}}^{\text{шас}}$ – продолжительность одного рейса ПДМ или ШАС, включая время на погрузку, разгрузку, движение с грузом и порожняком, ожидание на разминовках, мин; $k_{\text{р}}$ – коэффициент разрыхления руды; $k_{\text{нер}}$ – коэффициент неравномерности.

3. Расчет стоимости машино-смены эксплуатации ПДМ $C_{\text{маш-см}}^{\text{пдм}}$ и ШАС $C_{\text{маш-см}}^{\text{шас}}$, руб./смену:

$$C_{\text{маш-см}}^{\text{пдм}} = \frac{\Pi_{\text{р}}^{\text{пдм}} N_{\text{а}} + 12 Z_{\text{от}}^{\text{пдм}} + 3 Z_{\text{рем}}^{\text{пдм}} + 3 Z_{\text{гсм}}^{\text{пдм}} + 3 Z_{\text{шин}}^{\text{пдм}} + 3 Z_{\text{вент}}^{\text{пдм}}}{n_{\text{дн}} n_{\text{см}}}, \quad (4)$$

$$C_{\text{маш-см}}^{\text{шас}} = \frac{\Pi_{\text{р}}^{\text{шас}} N_{\text{а}} + 12 Z_{\text{от}}^{\text{шас}} + 3 Z_{\text{рем}}^{\text{шас}} + 3 Z_{\text{гсм}}^{\text{шас}} + 3 Z_{\text{шин}}^{\text{шас}} + 3 Z_{\text{вент}}^{\text{шас}}}{n_{\text{дн}} n_{\text{см}}}, \quad (5)$$

где $\Pi_{\text{р}}^{\text{пдм}}$, $\Pi_{\text{р}}^{\text{шас}}$ – рыночная стоимость ПДМ или ШАС, руб.; $N_{\text{а}}$ – норма амортизации, доли ед.; $Z_{\text{от}}$ – месячный фонд оплаты труда машиниста и обслужи-

вающего персонала, руб.; $Z_{рем}$, $Z_{гсм}$, $Z_{шин}$, $Z_{вент}$ – годовые расходы на ремонт, горюче-смазочные материалы, шины и проветривание выработок, руб.; $n_{дн}$ – количество рабочих дней в году; $n_{см}$ – количество рабочих смен в сутки.

4. Расчет удельных эксплуатационных затрат на выпуск и доставку руды ПДМ $\Delta Z_{вд}$ и транспортирование руды ШАС $\Delta Z_{тр}$, руб./т [18]:

$$\Delta Z_{вд} = C_{маш-см}^{пдм} / P_{см}^{пдм}, \quad (6)$$

$$\Delta Z_{тр} = C_{маш-см}^{шас} / P_{см}^{шас}. \quad (7)$$

5. Расчет минимальной площади поперечного сечения основных ПНВ и ТВ (горизонтальные или слабонаклонные выработки с коробовым сводом) S , m^2 , с учетом регламентируемых зазоров безопасности, крепости пород и габаритов ПДМ и ШАС:

а) выработки с проходом для людей:

– при $f \leq 12$

$$S_{дост}^{орт} = (A_{пдм} + b_1 + b_2 + \beta) \times [h_{пдм} + h_1 + 0,262(A_{пдм} + b_1 + b_2 + \delta)], \quad (8)$$

$$S_{тр}^{орт} = S_{тр}^{штр} = S_{кв} = (A_{пдм} + b_1 + b_2 + \beta) \times [h_{шас} + h_1 + 0,262(A_{пдм} + b_1 + b_2 + \delta)]; \quad (9)$$

– при $f > 12$

$$S_{бур}^{орт} = (A_{пдм} + b_1 + b_2) \times [h_{пдм} + h_1 + 0,175(A_{пдм} + b_1 + b_2)], \quad (10)$$

б) выработки без прохода для людей:

– при $f \leq 12$

$$S_{бд}^{штр} = (A_{пдм} + 2b_1 + \beta) \times [h_{пдм} + h_1 + 0,262(A_{пдм} + 2b_1 + \delta)], \quad (11)$$

– при $f > 12$

$$S_{вент}^{штр} = (A_{пдм} + 2b_1)[h_{пдм} + h_1 + 0,175(A_{пдм} + 2b_1)], \quad (12)$$

где $S_{дост}^{орт}$, $S_{бд}^{штр}$, $S_{бур}^{орт}$, $S_{вент}^{штр}$, $S_{тр}^{орт}$, $S_{тр}^{штр}$, $S_{кв}$ – площадь поперечного сечения доставочного орта, буро-доставочного штрека, бурового орта, вентиляционного штрека, транспортного орта, штрека и квершлага, m^2 ; f – коэффициент крепости пород по шкале М.М. Протождяконова; $A_{пдм}$, $A_{шас}$ – ширина ПДМ или ШАС, м; b_1 – минимальный зазор между стенкой выработки и габаритом машины, м; b_2 – минимальный зазор между стенкой выработки и габаритом машины, учитывающий проход для людей, м; β – толщина крепи выработки, м; $h_{пдм}$, $h_{шас}$ – высота ПДМ или ШАС, м; h_1 – высота от габарита машины до пяты свода выработки, м.

6. Расчет объемов проходки ПНВ в блоке $V_{пнв}$ и ТВ вне блока $V_{тв}$, m^3 , исходя из размеров блока:

$$V_{пнв} = 2 \left(\frac{B_k + B_{мкц}}{\cos \alpha_{рт}} S_{дост}^{орт} + L_{бл} S_{бд}^{штр} \right) + \frac{B_k + B_{мкц}}{\cos \alpha_{рт}} S_{бур}^{орт} + L_{бл} S_{вент}^{штр}, \quad (13)$$

$$V_{тв} = (B_k + B_{мкц}) S_{тр}^{орт} + \frac{L_{бл}}{N_{бл}} S_{тр}^{штр} + \frac{H}{\text{tg } \delta N_{бл} k_{бл}} S_{кв}, \quad (14)$$

где $N_{бл}$ – число блоков в отработке, шт.; $k_{бл}$ – коэффициент, учитывающий долю запасов блока в общих запасах этажа; H – глубина разработки, м; δ – угол сдвига горных пород, град.

7. Расчет удельных эксплуатационных затрат на проходку выработок $\Delta Z_{пр}$, руб./т:

$$\Delta Z_{пр} = (V_{пнв} C_{пнв}^{1м} + V_{тв} C_{тв}^{1м}) / Q_{эксп}, \quad (15)$$

где $C_{пнв}^{1м}$, $C_{тв}^{1м}$ – стоимость проходки 1 m^3 ПНВ и ТВ, руб./ m^3 .

8. Расчет суммарных удельных эксплуатационных затрат на выпуск и доставку, транспортирование руды и проходку выработок $\sum \Delta Z$, руб./т, и определение оптимального состава КСО по грузоподъемности ПДМ и ШАС для отработки блока:

$$\sum \Delta Z = \frac{C_{маш-см}^{пдм} + N_{расч}^{шас} C_{маш-см}^{шас}}{P_{см}^{пдм}} + \frac{V_{пнв} C_{пнв}^{1м} + V_{тв} C_{тв}^{1м}}{Q_{эксп}} \rightarrow \min, \quad (16)$$

где $N_{расч}^{шас}$ – расчетное количество ШАС, обеспечивающее производительность ПДМ, шт.

9. Определение области поиска оптимальной производственной мощности рудника $A_{шх}^{орт}$ путем установления верхней границы, соответствующей ее величине, определяемой по горным возможностям, и нижней границы, соответствующей величине, достигнутой на начальном этапе развития мощности рудника.

10. Расчет суммарных удельных эксплуатационных затрат на выпуск и доставку, транспортирование руды, проходку выработок и амортизацию оборудования $\sum \Delta Z'$, руб./т, и определение оптимальной производственной мощности рудника:

$$\sum \Delta Z' = \sum \Delta Z + \frac{n_{см}}{A_{шх}} \left(\frac{\Pi_p^{пдм} H_a}{k_{эф}^{пдм}} + \frac{\Pi_p^{шас} H_a}{k_{эф}^{шас}} \right) \rightarrow \min, \quad (17)$$

где $A_{\text{шх}}$ – годовая производственная мощность рудника, руб./год; $k_{\text{эф}}^{\text{пдм}}$, $k_{\text{эф}}^{\text{шас}}$ – коэффициенты эффективного использования ПДМ и ШАС в течение года, доли ед.;

$$k_{\text{эф}}^{\text{пдм}} = \frac{N_{\text{раб}}^{\text{пдм}}}{N_{\text{расч}}^{\text{пдм}}}, \quad (18)$$

$$k_{\text{эф}}^{\text{шас}} = \frac{N_{\text{раб}}^{\text{шас}}}{N_{\text{расч}}^{\text{шас}}}, \quad (19)$$

где $N_{\text{расч}}^{\text{пдм}}$, $N_{\text{расч}}^{\text{шас}}$, $N_{\text{раб}}^{\text{пдм}}$, $N_{\text{раб}}^{\text{шас}}$ – расчетное и рабочее количество ПДМ и ШАС в смену, шт.;

$$N_{\text{расч}}^{\text{пдм}} = \frac{A_{\text{шх}}}{P_{\text{см}}^{\text{пдм}} n_{\text{дн}} n_{\text{см}}}, \quad (20)$$

$$N_{\text{расч}}^{\text{шас}} = \frac{A_{\text{шх}}}{P_{\text{см}}^{\text{шас}} n_{\text{дн}} n_{\text{см}}}. \quad (21)$$

Результаты исследования и их обсуждение

На основе экономико-математического моделирования по предложенной методике (формулы (1)-(21)) установлены оптимальный состав КСО и оптимальная производственная мощность, обеспечиваемая данным КСО, в зависимости от мощности залежи (от 10 до 25 м) при применении КСР, сочетающей выемку камер с плоским днищем и этажное обрушение междукамерных целиков (МКЦ) на траншейное днище, в условиях рудника «Заполярный» [4, 20]. Оптимальные параметры и показатели КСР в зависимости от мощности залежи приведены в **табл. 1**.

Принятая схема доставки руды: очистной забой – буро-доставочный штрек – доставочный орт – рудоспуск. Длина доставки составляет 150-200 м. Схема транспортирования руды: рудоспуск – транспортный орт – транспортный штрек – квершлаг – ствол. Длина транспортирования – 1 км.

Исследован типоразмерный ряд дизельных ПДМ и ШАС производства фирмы «Yantai Xingye Machinery» (аналог «Еріос»). Технические характеристики ПДМ и ШАС приведены в **табл. 2**.

Результаты расчета сменной эксплуатационной производительности, стоимости машино-смены и удельных затрат на выпуск и доставку руды ПДМ и транспортирование руды ШАС в зависимости от грузоподъемности ПДМ и ШАС приведены на **рис. 1**.

Таблица 1. Параметры и показатели комбинированной системы разработки в зависимости от мощности залежи
Table 1. The parameters and indicators of combined mining method depending on deposit thickness

| Параметры и показатели | Мощность залежи, м | | | |
|--|--------------------|--------|--------|--------|
| | 10 | 15 | 20 | 25 |
| Длина камеры и МКЦ, м | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Ширина камеры и МКЦ, м | 8 | 12 | 16 | 20 |
| Угол откоса траншеи МКЦ, град | 65 | | | 60 |
| Высота породной выпускной траншеи МКЦ, м | 4,8 | 9,3 | 13,9 | 15,1 |
| Балансовые запасы блока, т | 48000 | 108000 | 192000 | 300000 |
| Потери, % | 13,3 | 9,1 | 5,1 | 3,1 |
| Разубоживание, % | 11,5 | 12,0 | 13,1 | 16,1 |
| Эксплуатационные запасы блока, т | 47024 | 111558 | 209675 | 346484 |

Таблица 2. Технические характеристики погрузочно-доставочной машины и шахтного автосамосвала
Table 2. Technical specifications of load-haul-dump machine and mine dump truck

| Параметры | Значения | | | | |
|--------------------------------|------------|---------|---------|---------|----------|
| | Модель ПДМ | XYWJ-3 | XYWJ-4 | XYWJ-6 | XYWJ-7,5 |
| Размеры, мм: | | | | | |
| – длина | 9200 | 9800 | 10600 | 11190 | |
| – ширина | 2474 | 2500 | 2750 | 3113 | |
| – высота | 2320 | 2500 | 2558 | 2745 | |
| Объем ковша, м ³ | 3,0 | 4,0 | 6,0 | 7,5 | |
| Паспортная грузоподъемность, т | 6 | 10 | 14 | 18 | |
| Мощность двигателя, кВт | 160 | 223 | 260 | 315 | |
| | Модель ШАС | XYUK-15 | XYUK-20 | XYUK-30 | XYUK-40 |
| Размеры, мм: | | | | | |
| – длина | 8300 | 9010 | 10135 | 10412 | |
| – ширина | 2000 | 2280 | 2800 | 3073 | |
| – высота | 2400 | 2450 | 2580 | 2811 | |
| Емкость кузова, м ³ | 7,5 | 10,5 | 15,0 | 20,0 | |
| Паспортная грузоподъемность, т | 15 | 20 | 30 | 40 | |
| Мощность двигателя, кВт | 165 | 240 | 315 | 405 | |

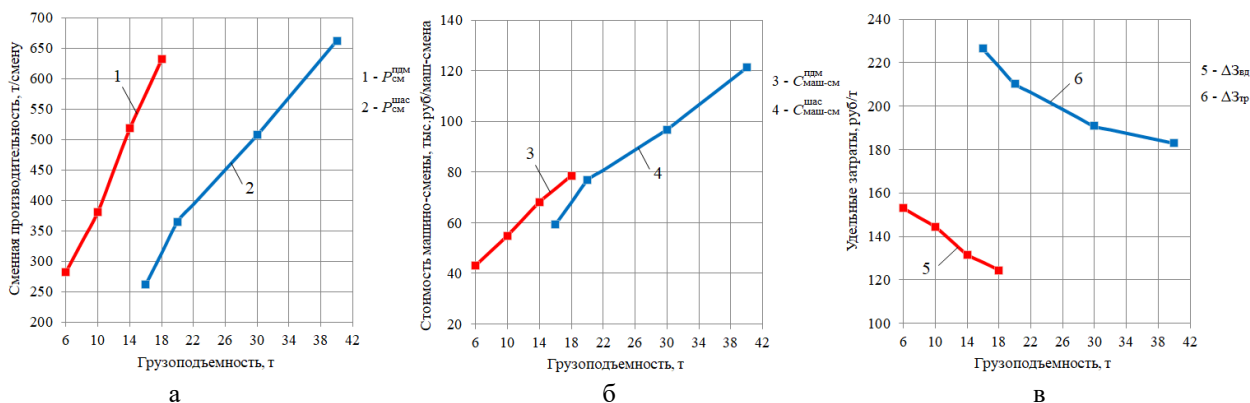


Рис. 1. Зависимости сменной производительности (а), стоимости машино-смены (б) и удельных затрат на выпуск и доставку, транспортирование руды (в) от грузоподъемности ПДМ и ШАС

Fig. 1. Dependences of shift productivity (a), machine shift cost (б) and the specific costs of ore loading, delivery, and transportation (в) on the load capacity of load-haul-dump machine and mine dump truck

Из графиков видно, что с увеличением грузоподъемности машин стоимость машино-смены и производительность растут, а удельные затраты как на выпуске и доставке, так и на транспортировании руды снижаются. Установлено, что с увеличением грузоподъемности машин суммарные удельные затраты на выпуск и доставку, транспортирование руды сни-

жаются на 23% за счет повышения производительности ПДМ в 2,2 раза и ШАС в 2,5 раза.

Результаты расчета удельных затрат на проходку ПНВ и ТВ с учетом их сечений (табл. 3) в зависимости от грузоподъемности ПДМ и ШАС при различной мощности залежи приведены на рис. 2.

Таблица 3. Сечения выработок в зависимости от грузоподъемности погрузочно-доставочной машины и шахтного автосамосвала

Table 3. The cross-sections of mine workings depending on the load capacity of load-haul-dump machine and mine dump truck

| Наименование выработки | Площадь поперечного сечения выработки, м ² | | | |
|--------------------------|---|---------|---------|----------|
| | ХУWJ-3 | ХУWJ-4 | ХУWJ-6 | ХУWJ-7,5 |
| Доставочный орт | 15,13 | 15,59 | 17,06 | 19,81 |
| Буро-доставочный штрек | 12,00 | 12,40 | 13,73 | 16,22 |
| Вентиляционный штрек | | | | |
| Модель ШАС | ХУУК-15 | ХУУК-20 | ХУУК-30 | ХУУК-40 |
| Транспортный орт и штрек | 12,90 | 14,36 | 17,41 | 19,92 |
| Квершлаг | | | | |

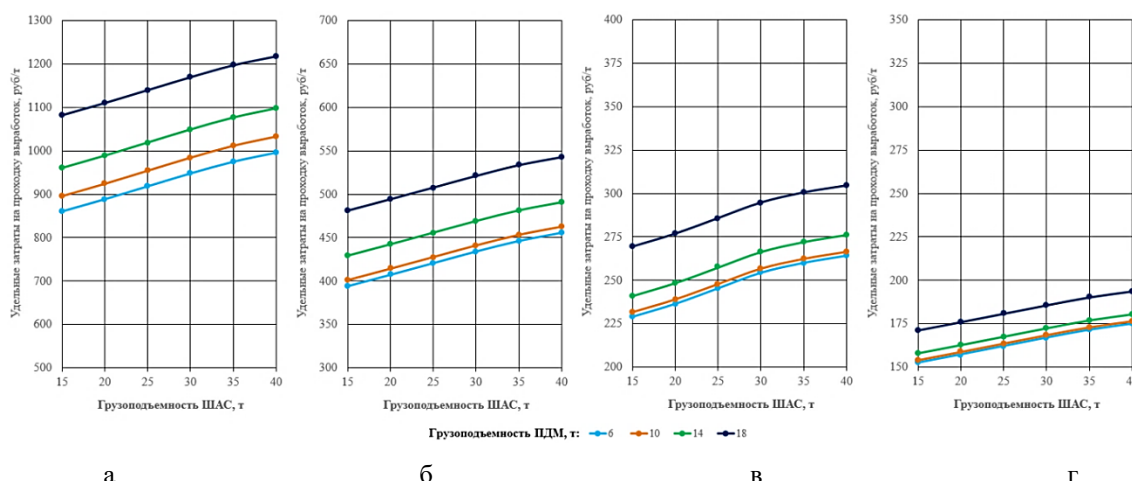


Рис. 2. Зависимости удельных затрат на проходку выработок от грузоподъемности ПДМ и ШАС при различной мощности залежи: а – 10 м; б – 15 м; в – 20 м; г – 25 м

Fig. 2. Dependences of the specific costs for excavation of workings on the load capacity of load-haul-dump machine and mine dump truck with different deposit thickness: a is 10 m; б is 15 m; в is 20 m; г is 25 m

Увеличение грузоподъемности ПДМ с 6 до 18 т ведет к увеличению сечений ПНВ в 1,3 раза и сокращению скорости их проходки на 18% (с 130 до 110 м/мес.). Увеличение грузоподъемности ШАС с 15 до 40 т ведет к увеличению сечений ТВ в 1,5 раза и сокращению скорости их проходки на 30% (с 90 до 70 м/мес.). Общее увеличение сроков строительства при общей протяженности ПНВ, равной 450 м, и ТВ, равной 1 км, составляет 3,5 месяца.

Установлено, что с увеличением грузоподъемности машин удельные затраты на проходку выработок повышаются вследствие увеличения сечений ПНВ в 1,3 раза и ТВ в 1,5 раза, а с увеличением мощности залежи уменьшаются в результате снижения удельного объема выработок на 1000 т добытой руды.

По критерию минимума суммарных удельных затрат на выпуск и доставку, транспортирование руды и проходку выработок установлены оптимальный состав КСО по грузоподъемности ПДМ и ШАС для отработки блока в зависимости от мощности залежи (рис. 3):

– при $m_{рт} = 10$ м – ПДМ 6 т + ШАС 15 т;

- при $m_{рт} = 15$ м – ПДМ 10 т + ШАС 20 т;
- при $m_{рт} = 20$ м – ПДМ 14 т + ШАС 30 т;
- при $m_{рт} = 25$ м – ПДМ 14 т + ШАС 40 т.

Для оптимального состава КСО по критерию минимума суммарных удельных затрат на выпуск и доставку, транспортирование руды, проходку выработок и амортизацию оборудования (с учетом рабочего количества ПДМ и ШАС) определена оптимальная производственная мощность рудника в зависимости от мощности залежи (рис. 4):

– при $m_{рт} = 10$ м и КСО: 4 ПДМ 6 т + 4 ШАС 15 т
– $A_{шх}^{opt} = 0,95$ млн т/год;

– при $m_{рт} = 15$ м и КСО: 4 ПДМ 10 т + 5 ШАС 20 т
– $A_{шх}^{opt} = 1,4$ млн т/год;

– при $m_{рт} = 20$ м и КСО: 4 ПДМ 14 т + 4 ШАС 30 т
– $A_{шх}^{opt} = 1,8$ млн т/год;

– при $m_{рт} = 25$ м и КСО: 5 ПДМ 14 т + 5 ШАС 40 т
– $A_{шх}^{opt} = 2,3$ млн т/год.

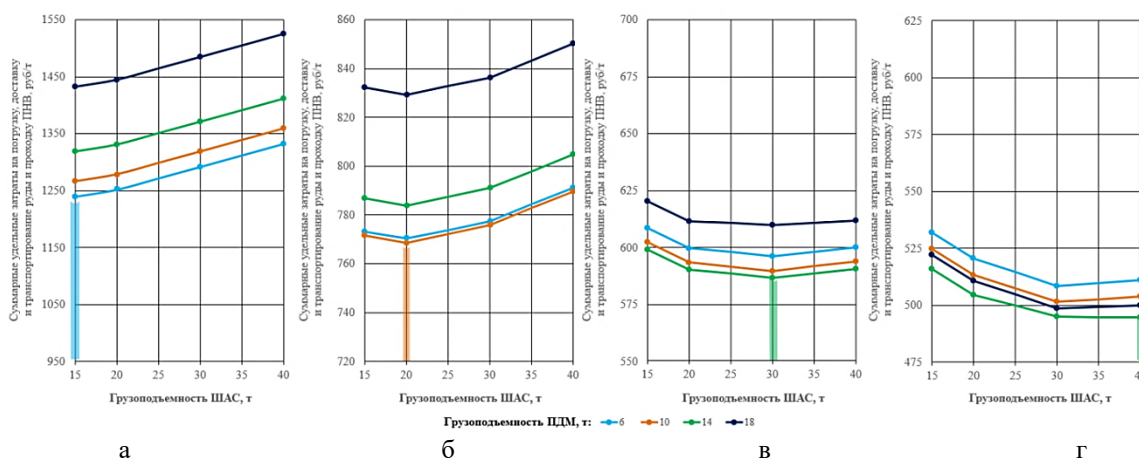


Рис. 3. Зависимости суммарных удельных затрат на выпуск и доставку, транспортирование руды и проходку выработок от грузоподъемности ПДМ и ШАС при мощности залежи: а – 10 м; б – 15 м; в – 20 м; г – 25 м
Fig. 3. Dependences of total specific costs for ore loading, delivery, and transportation and excavation of workings on the load capacity of load-haul-dump machine and mine dump truck with deposit thickness: a is 10 m; б is 15 m; в is 20 m; г is 25 m

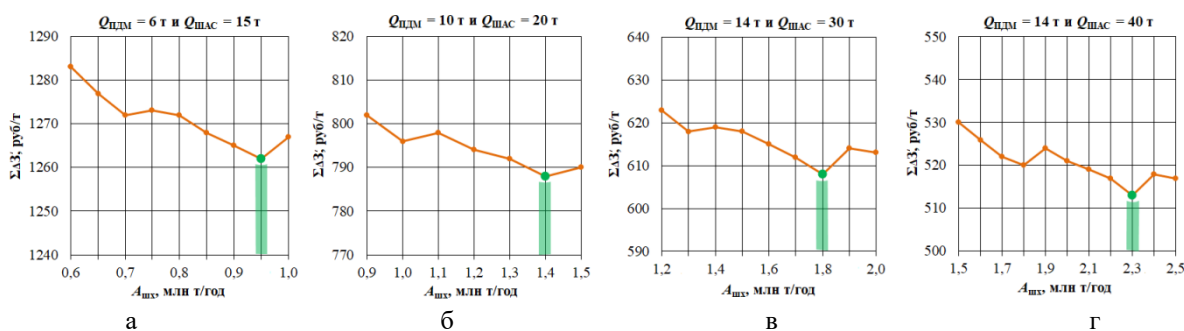


Рис. 4. Зависимости суммарных удельных затрат на выпуск и доставку, транспортирование руды, проходку выработок и амортизацию оборудования от производственной мощности рудника при мощности залежи: а – 10 м; б – 15 м; в – 20 м; г – 25 м
Fig. 4. Dependences of total specific costs for ore loading, delivery, and transportation and excavation of workings and depreciation of equipment on production capacity of mine with deposit thickness: a is 10 m; б is 15 m; в is 20 m; г is 25 m

Результаты исследования доказывают, что эффективность работы КСО зависит от соответствия параметров машин горно-геологическим и горнотехническим условиям разработки. Применение оптимальных КСО способствует сближению величин производственной мощности по горным возможностям и экономическим соображениям.

Заключение

Предложен новый подход к определению оптимальной величины производственной мощности рудника, основанный на оценке эффективности и выборе оптимального состава КСО на очистной выемке и транспортировании руды, и разработана соответствующая методика, отличающаяся учетом размеров блока, зависящих от мощности залежи, сечений подготовительно-нарезных и транспортных выработок, определяемых габаритами размещаемых в них машин, фактической грузоподъемности и рабочего количества ПДМ и ШАС, необходимых для обеспечения годового объема добычи.

Получены зависимости сменной производительности, стоимости машино-смены и удельных эксплуатационных затрат на выпуск и доставку, транспортирование руды и проходку подготовительно-нарезных и транспортных выработок от мощности залежи и грузоподъемности ПДМ и ШАС.

Установлены оптимальный состав КСО для отработки блока и оптимальная годовая производственная мощность рудника, обеспечиваемая данным КСО, в зависимости от мощности залежи, изменяющейся от 10 до 25 м.

Список источников

1. Яковлев В.Л. О методологии комплексного освоения запасов месторождений твердых полезных ископаемых для разработки стратегии развития минерально-сырьевой базы России // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2020. № 7. С. 5-20. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-7-5-20
2. Обоснование конструкции и параметров комбинированной системы разработки пологой залежи бедных комплексных руд / И.В. Соколов, Ю.Г. Антипин, И.В. Никитин, Р.В. Криницын // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. № 5-1. С. 88-104. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-51-0-88
3. Обоснование рациональной конструкции днища блока при комбинированной системе разработки пологих залежей средней мощности / И.В. Соколов, Ю.Г. Антипин, И.В. Никитин, Ю.М. Соломеин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. № 3. С. 5-12. DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-3-5-12
4. Исследование параметров и показателей комбинированной системы разработки пологих месторождений в зависимости от мощности залежи / И.В. Соколов, Ю.Г. Антипин, И.В. Никитин, Ю.М. Соломеин // Проблемы недропользования. 2024. № 3 (42). С. 6-15.
5. Каплунов Д.Р. Развитие производственной мощности подземных рудников при техническом перевооружении. М.: Наука, 1989. 263 с.
6. Справочник по горнорудному делу / под ред. В.А. Гребенюка, Я.С. Пыжьянова, И.Е. Ерофеева. М.: Недра, 1983. 816 с.
7. Шестаков В.А. Проектирование рудников. М.: Недра, 1987. 234 с.
8. Гибадуллин З.Р., Калмыков В.Н., Петрова О.В. Технологические схемы транспортирования рудной массы при подземной отработке приконтурных запасов карьеров. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2016. 159 с.
9. Смирнов А.А., Чернецов В.А., Чернецов Д.В. Методика расчета производительности самоходного горного оборудования (на примере норильских подземных рудников) // Горный журнал. 2010. № 6. С. 88-90.
10. Greberg J., Salama A. Analysis of the current challenges for deep underground mines: Labour productivity improvement // Tanzania Journal of Engineering and Technology. 2020, vol. 39, no. 1, pp. 32-46.
11. Jakkula B., Mandela G.R., Chivukula S.M. Reliability, availability and maintainability (RAM) investigation of load haul dumpers (LHDs): a case study // International Journal of System Assurance Engineering and Management. 2021. DOI: 10.1007/s13198-021-01154-3
12. Nieto A., Schatz R.S., Dogruoz C. Performance analysis of electric and diesel equipment for battery replacement of tethered LHD vehicles in underground mining // Mining Technology. 2020, vol. 129, no. 1, pp. 22-29. DOI: 10.1080/25726668.2020.1720371
13. Шестаков В.А., Крушнов В.М., Славиковский О.В. Метод сравнительной оценки комплексов горных машин для рудных шахт в современных экономических условиях // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2006. № 1. С. 3-8.
14. Македонский О.М. Обоснование эффективного применения погрузо-доставочных и транспортных машин при подземной разработке гипсовых месторождений: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 25.00.22 / Македонский Олег Михайлович. Москва, 2005. 18 с.
15. Акашев З.Т., Данияров Н.А., Тоғизбаева Б.Б. Методика сравнительной оценки комплексов самоходного горного оборудования // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. 2008. № 1 (35). С. 7-106.
16. Выбор и обоснование комплекса механизации для систем разработки с обрушением руды и вмещающих пород / А.В. Красавин, В.А. Иванов, Н.Е. Пудовкин, Р.А. Каримов // Актуальные проблемы горного дела. 2020. № 1. С. 17-20.
17. Скорняков Ю.Г. Подземная добыча руд комплексами самоходных машин. М.: Недра, 1986. 204 с.
18. Пухов Ю.С. Рудничный транспорт. М.: Недра, 1991. 238 с.
19. Методика определения оптимальных параметров породной выпускной траншеи при комбинированной системе разработки пологопадающих месторождений / Ю.Г. Антипин, А.А. Смирнов, И.В. Никитин, Ю.М. Соломеин // Горная промышленность. 2024. № 5. С. 116-121.
20. Антипин Ю.Г., Смирнов А.А., Никитин И.В. Обоснование безопасности комбинированной системы разработки в условиях рудника «Заполярный» // Горный

информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2023. № 8. С. 138-151. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_8_0_138

References

1. Yakovlev V.L. Solid mineral deposits integrated development methodology for Russian mineral resource base development strategy. *Izvestiya vuzov. Gorniy zhurnal* [Minerals and Mining Engineering]. 2020;(7):5-20. (In Russ.) DOI: 10.21440/0536-1028-2020-7-5-20.
2. Sokolov I.V., Antipin Yu.G., Nikitin I.V., Krinitsyn R.V. Substantiation of the design and parameters of the combined system for the development of a shallow deposit of poor complex ores. *Gorniy informatsionno-analiticheskiy bulletin* [Mining Information and Analytical Bulletin]. 2021;(5-1):88-104. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236-1493-2021-51-0-88.
3. Sokolov I.V., Antipin Yu.G., Nikitin I.V., Solomein Yu.M. Substantiation of a rational block bottom structure at a combined mining system of shallow deposits of medium capacity. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024;22(3):5-12. (In Russ.) DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-3-5-12.
4. Sokolov I.V., Antipin Yu.G., Nikitin I.V., Solomein Yu.M. Research of parameters and indicators of a combined mining system for shallow deposits depending on the capacity of the deposit. *Problemy nedropolzovaniya* [Problems of Subsoil Use]. 2024;(3(42)):6-15. (In Russ.)
5. Kaplunov D.R. *Razvitiye proizvodstvennoy moshchnosti podzemnykh rudnikov pri tekhnicheskoy perevooruzhenii* [Development of the production capacity of underground mines during technical re-equipment]. Moscow: Nauka, 1989, 263 p. (In Russ.)
6. Grebenyuk V.A., Pyzhyanov Ya.S., Yerofeyev I.E. *Spravochnik po gornorudnomu delu* [Mining Handbook]. Moscow: Nedra, 1983, 816 p. (In Russ.)
7. Shestakov V.A. *Proektirovaniye rudnikov* [Mine design]. Moscow: Nedra, 1987, 234 p. (In Russ.)
8. Gibadullin Z.R., Kalmykov V.N., Petrova O.V. *Tekhnologicheskie skhemy transportirovaniya rudnoi massy pri podzemnoy obrabotke prikonturnykh zapasov karerov* [Technological schemes for the transportation of ore mass during underground mining of pits short-range reserves]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University Publishing House, 2016, 159 p. (In Russ.)
9. Smirnov A.A., Chernetsov V.A., Chernetsov D.V. Methodology for calculating the productivity of self-propelled mining equipment (using the example of the Norilsk underground mines). *Gorniy zhurnal* [Mining Journal]. 2010;(6):88-90. (In Russ.)
10. Greberg J., Salama A. Analysis of the current challenges for deep underground mines: Labour productivity improvement. *Tanzania Journal of Engineering and Technology*. 2020;39(1):32-46.
11. Jakkula B., Mandela G.R., Chivukula S.M. Reliability, availability and maintainability (RAM) investigation of load haul dumpers (LHDs): a case study. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*. 2021. DOI: 10.1007/s13198-021-01154-3
12. Nieto A., Schatz R.S., Dogruoz C. Performance analysis of electric and diesel equipment for battery replacement of tethered LHD vehicles in underground mining. *Mining Technology*. 2020;129(1):22-29. DOI: 10.1080/25726668.2020.1720371
13. Shestakov V.A., Krupnov V.M., Slavikovskiy O.V. The method of comparative evaluation of mining machinery complexes for ore mines in modern economic conditions. *Izvestiya vuzov. Gorniy zhurnal* [Minerals and Mining Engineering]. 2006;(1):3-8. (In Russ.)
14. Makedonsky O.M. *Obosnovanie effektivnogo primeneniya pogruzo-dostavochnykh i transportnykh mashin pri podzemnoy razrabotke gipsovykh mestorozhdeniy: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Justification of the effective use of LHD machines in the underground mining of gypsum deposits. Extended abstract of Ph.D. dissertation]. Moscow, 2005, 18 p.
15. Akashev Z.T., Daniyarov N.A., Togizbayeva B.B. Method of comparative evaluation of self-propelled mining equipment complexes. *Progressivnyye tekhnologii i sistemy mashinostroeniya* [Advanced technologies and systems of mechanical engineering]. 2008;(1(35)):7-016. (In Russ.)
16. Krasavin A.V., Ivanov V.A., Pudovkin N.E., Karimov R.A. Selection and justification of a complex of mechanization for mining systems with caving of ore and host rocks. *Aktualnye problemy gornogo dela* [Current issues of mining]. 2020;(1):17-20. (In Russ.)
17. Skornyakov Yu.G. *Podzemnaya dobycha rud kompleksami samokhodnykh mashin* [Underground mining of ores by complexes of self-propelled machines]. Moscow: Nedra, 1986, 204 p. (In Russ.)
18. Pukhov Yu.S. *Rudnichniy transport* [Mining transport]. Moscow: Nedra, 1991, 238 p. (In Russ.)
19. Antipin Yu.G., Smirnov A.A., Nikitin I.V., Solomein Yu.M. Methodology for determining the optimal parameters of a rock release trench in the combined mining system for shallow dipping deposits. *Gornaya promyshlennost* [Russian Mining Industry]. 2024;(5S):116-121. (In Russ.)
20. Antipin Yu.G., Smirnov A.A., Nikitin I.V. Validation of safety in mixed-type mining: A case-study of Zapolyarny Mine. *Gorniy informatsionno-analiticheskiy bulletin* [Mining Information and Analytical Bulletin]. 2023;(8):138-151. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236_1493_2023_8_0_138

Поступила 12.08.2025; принята к публикации 05.11.2025; опубликована 31.03.2026
Submitted 12/08/2025; revised 05/11/2025; published 31/03/2026

Антипин Юрий Георгиевич – кандидат технических наук, заведующий лабораторией подземной геотехнологии, Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия.
Email: geotech@igduran.ru. ORCID 0000-0002-3564-0310

Никитин Игорь Владимирович – кандидат технических наук,
научный сотрудник лаборатории подземной геотехнологии,
Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия.
Email: opening-kp@yandex.ru. ORCID 0000-0002-3593-4319

Yuri G. Antipin – PhD (Eng.), Head of the Laboratory of Underground Geotechnology,
Institute of Mining Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia.
E-mail: geotech910@yandex.ru. ORCID 0000-0002-3564-0310

Igor V. Nikitin – PhD (Eng.), Researcher, Laboratory of Underground Geotechnology,
Institute of Mining Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia.
E-mail: opening-kp@yandex.ru. ORCID 0000-0002-3593-4319

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.743.42

DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-1-32-39



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБОЛОЧЕЧНЫХ ЛИТЕЙНЫХ СТЕРЖНЕЙ НА ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЕ

Войтенко В.В., Медведчук С.А., Брешев В.Е., Войтенко Г.О.

Луганский государственный университет им. В. Даля, Луганск, Луганская Народная Республика, Россия

Аннотация. Постановка задачи. Представляют интерес технологические возможности применения органического связующего вещества — эпоксидной смолы — при приготовлении стержневой смеси на основе измельченного кварцевого песка, предназначенной для изготовления тонкостенных оболочечных литейных стержней, внутренний объем которых заполнен сухим кварцевым песком без связующего вещества. Актуальность таких исследований объясняется сложностью выбивания крупных и средних песчаных литейных стержней из алюминиевых отливок. Также представляет научный и практический интерес сравнительный анализ физико-технических свойств оболочечных литейных стержней, изготовленных с применением органических и неорганических связующих веществ, и технологических особенностей их изготовления для обоснования выбора стержневой технологии в соответствии с поставленной задачей. **Цель работы.** Проведение экспериментальных исследований физико-технических свойств тонкостенных оболочечных литейных стержней на органическом связующем веществе, внутренний объем которых заполнен сухим кварцевым песком без связующего вещества, а также выполнение сравнительного анализа оболочечных литейных стержней, изготовленных с применением как органических, так и неорганических связующих веществ. **Используемые методы.** Испытания на прочность при растяжении, сжатии и изгибе; испытания на выбиваемость литейных стержней из отливок; испытания на термическую стойкость; Эпокси-процесс; V-процесс. **Новизна.** Предложена и исследована стержневая технология, объединяющая в себе достоинства наиболее перспективных стержневых процессов: Эпокси-процесса и V-процесса. **Результат.** Показана возможность использования тонкостенных оболочечных песчаных литейных стержней, внутренняя полость которых заполнена сухим кварцевым песком без связующего вещества, при литье алюминия и его сплавов, а также выявлены преимущества таких литейных стержней по сравнению с традиционными объемными литейными стержнями. **Практическая значимость.** Приведены результаты экспериментальных исследований физико-технических свойств тонкостенных оболочечных песчаных литейных стержней, внутренняя полость которых заполнена сухим кварцевым песком без связующего вещества, и даны рекомендации по их использованию.

Ключевые слова: литейный стержень, оболочка, связующее вещество, стержневая смесь, эпоксидная смола, кварцевый песок, прочность, выбиваемость, термическая стойкость, физико-технические свойства

© Войтенко В.В., Медведчук С.А., Брешев В.Е., Войтенко Г.О., 2026

Для цитирования

Экспериментальные исследования оболочечных литейных стержней на эпоксидной смоле / Войтенко В.В., Медведчук С.А., Брешев В.Е., Войтенко Г.О. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №1. С. 32-39. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-32-39>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

EXPERIMENTAL STUDIES OF SHELL MOLDING CORES BONDED WITH EPOXY RESIN

Voytenko V.V., Medvedchuk S.A., Breshev V.E., Voytenko G.O.

Vladimir Dahl Lugansk State University, Lugansk, LPR, Russia

Abstract. Problem Statement. The technological feasibility of employing an organic binder such as epoxy resin in the preparation of core molding mixtures based on ground quartz sand is of significant relevance. The proposed mixtures are intended for the manufacture of thin-walled shell molding cores featuring an internal cavity filled with dry, binder-free quartz sand. The relevance of this research is attributed to the complexity of the knocking-out of large and medium-sized sand cores from aluminum castings. A comparative analysis of the physical and technical properties of shell cores bonded with organic and inorganic binders, as well as the technological features of their production is of both scientific and practical interest. This analysis substantiates the selection of core-making technologies in accordance with stated objectives. **Objectives.** The research is aimed at conducting experimental research of the physical and technical properties of thin-walled sand shell molding cores bonded with organic binders and featuring an internal cavity filled with dry, binder-free quartz sand, as well as performing a comparative analysis of shell molding cores bonded with both organic and inorganic binders. **Methods Applied.** The paper contains tests for tensile, compressive, and flexural strength; tests for knocking-out ability of cores from castings; tests for thermal resistance; Epoxy process; V-process. **Originality.** A core-making technology integrating the advantages of the most promising core-making processes such as the Epoxy process and the V-process has been proposed and studied. **Result.** The feasibility of employing thin-walled sand shell molding cores featuring an internal cavity filled with dry, binder-free quartz sand during the casting of aluminum and its alloys has been demonstrated. The advantages of such molding cores compared to conventional solid molding cores have been revealed. **Practical Relevance.** The results of experimental research of the physical and technical properties of thin-walled sand shell molding cores featuring an internal cavity filled with dry, binder-free quartz sand have been presented, accompanied by recommendations for their practical application.

Keywords: molding core, shell, binder, core molding mixture, epoxy resin, quartz sand, strength, knocking-out ability, thermal resistance, physical and technical properties

For citation

Voytenko V.V., Medvedchuk S.A., Breshev V.E., Voytenko G.O. Experimental Studies of Shell Molding Cores Bonded with Epoxy Resin. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 1, pp. 32-39. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-32-39>

Введение

Стержневые процессы являются важной частью современного литейного производства. Заслуженный интерес в мире получили оболочечные стержневые процессы благодаря экономии связующего вещества и легкого удаления кварцевого песка из внутренних полостей отливки, о чем свидетельствуют современные исследования в этом направлении [1, 2]. Наиболее часто используются органические связующие вещества. Применение фенолоформальдегидных и фурановых синтетических смол в качестве связующих веществ в современных стержневых процессах объясняется высокой технологичностью стержневого процесса, хорошей манипуляторной прочностью и отличной выбиваемостью литейных стержней из отливок, изготовленных по Cold-Vox-процессу [3–5]. В ряде случаев в качестве связующих веществ для приготовления стержневых смесей на основе формовочного кварцевого песка применяются эпоксидные смолы, которые также обеспечивают изготовление песчаных литейных стержней с физико-техническими свойствами, схожими со свойствами литейных стержней на фенолоформальдегидных и фурановых синтетических смолах [6, 7]. Немаловажной осо-

бенностью стержневых технологий на органических связующих веществах — синтетических смолах — является высокая производительность стержневого процесса [8, 9]. Песчаные литейные стержни на органических связующих веществах синтетического происхождения могут быть изготовлены практически любой сложности и массы [10]. Что же касается оболочечных песчаных литейных стержней, то качество оболочки песчаного литейного стержня зависит от многих факторов, влияние которых в настоящее время полностью не изучено и требует дополнительных исследований.

Традиционно применяются объемные песчаные литейные стержни, технология изготовления которых наиболее проста. Однако объемные песчаные литейные стержни в процессе использования не всегда в достаточной степени обеспечивают хорошую выбиваемость и достаточную термическую стойкость поверхности к воздействию со стороны металлического расплава. Например, при литье алюминия могут возникнуть сложности с выбиванием из отливок песчаных литейных стержней, имеющих сравнительно большой объем, вследствие неполного термического разложения органического связующего вещества по всему объему литейного стержня. При литье объем-

ных отливок из чугуна и стали термическая стойкость песчано-смоляных литейных стержней может оказаться недостаточной для получения качественных внутренних поверхностей в отливке. Несмотря на неоспоримые достоинства применения органических связующих веществ синтетического происхождения, они имеют ряд недостатков. Стержневой процесс не является полностью безопасным для персонала стержневого участка, поскольку при термическом разложении синтетических смол, используемых в качестве связующих веществ, выделяются жидкие и газообразные токсичные вещества [11, 12].

Применение синтетических смол в качестве связующих веществ, по сравнению с неорганическими связующими веществами, например жидким натриевым стеклом, приводит к меньшей термической стойкости поверхностей песчаных литейных стержней, что необходимо учитывать при литье металлов и сплавов со сравнительно высокими температурами плавления. Еще к одному недостатку стержневого процесса на органических синтетических смолах можно отнести сложность применения оборотной стержневой смеси из-за содержания углерода, что увеличивает экологическую нагрузку на окружающую среду. Кроме того, органические синтетические смолы стоят заметно дороже по сравнению с неорганическими связующими веществами, например жидким натриевым стеклом, что имеет значение при изготовлении песчаных литейных стержней большой массы. Указанные недостатки могут быть частично устранены путем применения оболочечных литейных стержней на синтетических органических связующих веществах с заполнением внутреннего пространства оболочки сухим чистым формовочным кварцевым песком либо оборотной стержневой смесью, без связующего вещества, поэтому исследования в данном направлении представляют собой актуальную научно-техническую задачу.

Целью работы является проведение экспериментальных исследований физико-технических свойств тонкостенных оболочечных литейных стержней на органическом связующем веществе, внутренний объем которых заполнен сухим формовочным кварцевым песком без связующего вещества, а также выполнение сравнительного анализа оболочечных литейных стержней, изготовленных с применением как органических, так и неорганических связующих веществ.

Материалы и методы исследования

Для улучшения выбиваемости песчаных литейных стержней на органических связующих веществах из алюминиевых отливок проведены экспериментальные исследования, направленные на оценку возможностей технологии изготовления оболочечных песчано-смоляных литейных стержней на органическом связующем веществе — эпоксидной смоле, а также исследованы физико-технические свойства оболочечных литейных стержней с заполнением внутренней полости сухим формовочным кварцевым песком либо оборотной стержневой смесью без свя-

зующего вещества. Для изготовления оболочечных песчаных литейных стержней использован измельченный путем перемалывания формовочный кварцевый песок марки 2К₁О₃025 по ГОСТ 2138–91 со средним размером частиц менее 100 мкм. Необходимость измельчения кварцевого песка для изготовления стержневой смеси, из которой изготавливалась оболочка песчаного литейного стержня, обоснована в ходе предварительных проведенных экспериментов по исследованию влияния размеров частиц кварцевого песка на смачиваемость поверхности стержневых ящиков стержневой смесью, изготовленных из различных материалов, таких как резина, силикон, полиэтилен, полипропилен, полистирол и полиэтилентерефталат. В качестве связующего вещества применялась эпоксидно-диановая смола марки ЭД-20 по ГОСТ 10587–84 с жидким отвердителем марки ПЭПА (полиэтиленполиамин) по ТУ 6-02-594-75 при массовом соотношении отвердителя к смоле, равном 1:10. Применение эпоксидной смолы в качестве связующего вещества обусловлено ее несколько меньшей вредностью для здоровья человека и меньшей стоимостью по сравнению с фурановыми смолами.

В ходе предварительных исследований установлено, что стержневые ящики из перечисленных материалов особо хорошо смачиваются стержневой смесью и имеют хорошую адгезию к их внутренней поверхности, когда средний размер частиц формовочного кварцевого песка составляет менее 100 мкм. При использовании эпоксидно-диановой смолы марки ЭД-20 можно кратковременно снизить ее вязкость путем подогрева до 30–40°C, с последующим охлаждением стержневого ящика до 10–20°C после формирования оболочечной формы для повышения вязкости эпоксидной смолы. Если вязкость эпоксидной смолы уменьшена вследствие добавления растворителя в количестве не более 5 мас. %, например метилового спирта либо технического ацетона, то повысить вязкость стержневой смеси можно путем подогрева стержневого ящика, в результате чего растворитель испарится. Однако для улучшения текучести лучше не использовать растворители, поскольку они снижают прочность и термостойкость, а также небезопасны для человека. Наилучшие результаты по улучшению текучести дает применение пластификатора марки ДБФ (дибутилфталат) в количестве до 10 мас. % от массы связующего вещества и отвердителя, что позитивно влияет на увеличение эластичности и прочности оболочечных песчаных литейных стержней. При использовании эпоксидно-диановой смолы марки ЭД-22 по ГОСТ 10587–84 с жидким отвердителем марки ПЭПА управлять вязкостью стержневой смеси удобно путем изменения ее температуры в диапазоне 10–60°C.

В случае изготовления литейных стержней в форме тел вращения либо близкой к ней, хорошие результаты дает вращение со скоростью менее 6 об/мин стержневого ящика для равномерного распределения стержневой смеси до ее первичной полимеризации, при которой она теряет текучесть, что позволяет получить более равномерную по толщине

оболочку литейного стержня. Стержневая смесь, подходящая для изготовления оболочечного литейного стержня, должна обладать при заполнении стержневого ящика достаточной текучестью, поэтому требуется повышенное содержание связующего вещества в ее составе. Это приводит к увеличению прочности оболочки литейного стержня после отверждения (полимеризации связующего вещества). Предварительная полимеризация эпоксидно-диановой смолы при температуре 23–25°C происходит в течение 1–2 ч, в то время как полная полимеризация происходит при такой температуре в течение 48–50 ч. Чтобы увеличить скорость предварительной полимеризации эпоксидно-диановой смолы в стержневой смеси в 2–3 раза, удобно повысить ее температуру до 30–40°C. После того как предварительная полимеризация эпоксидно-диановой смолы в стержневой смеси произошла, можно таким же способом в 8–10 раз повысить скорость полимеризации смолы для достижения манипуляторной прочности оболочечного литейного стержня, для чего можно повысить его температуру в стержневом ящике до 40°C и более.

Для испытаний на прочность оболочечных песчаных литейных стержней использовались образцы специальной формы и машина для испытаний на прочность при растяжении, сжатии и изгибе. Для определения степени коробления оболочечного песчаного литейного стержня использовалась методика, основанная на сравнении изображений литейного стержня, полученных в одинаковом масштабе, до и после термического воздействия. Термическая стойкость оболочечного литейного стержня определялась по времени его нахождения при температуре испытаний до момента начала разрушения литейного стержня (момента начала осыпания его поверхности).

Для сравнения результатов исследований физико-технических свойств оболочечных песчано-смоляных литейных стержней на органическом связующем веществе — эпоксидной смоле — с результатами испытаний песчано-жидкостекольных литейных стержней использовались аналогичные стержневые ящики и измельченный кварцевый песок аналогичного помола. Заполнение оболочечных песчаных литейных стержней чистым кварцевым песком без связующего вещества осуществлялось после затвердевания оболочки и набора требуемой манипуляторной прочности. После заполнения оболочечных песчаных литейных стержней чистым кварцевым песком они запечатывались стержневой смесью, состав которой аналогичен составу смеси, примененной для изготовления оболочки литейного стержня. В процессе проведения серии экспериментов средняя толщина оболочки литейного стержня варьировалась в диапазоне от 1 до 10 мм.

Полученные результаты и их обсуждение

В результате экспериментальных исследований возможностей технологии изготовления оболочечных песчано-смоляных литейных стержней на органическом связующем веществе — эпоксидной смоле, а

также их физико-технических свойств было установлено следующее. Для изготовления оболочечных литейных стержней могут быть применены стержневые ящики, изготовленные либо покрытые следующими материалами: силикон; резина; полиэтилен; полипропилен; полистирол; ПЭТ (полиэтилентерефталат). Силикон и резина, благодаря пластичности, оказывают минимальное силовое воздействие при извлечении из стержневого ящика оболочечного литейного стержня. Полиэтилен, полипропилен, полистирол и ПЭТ могут быть применены для тонкостенных стержневых ящиков, которые могут быть изготовлены методами экструзии на термопластавтоматах либо путем штамповки в пластическом состоянии. Недостатками этих материалов, с точки зрения применения для изготовления стержневых ящиков, являются их удовлетворительные адгезия и смачиваемость стержневыми смесями на органических и особенно на неорганических связующих веществах. Однако использование формовочного кварцевого песка мелкого помола позволяет повысить вязкость таких стержневых смесей и улучшить адгезию и смачиваемость материала стержневого ящика.

Установлено, что в зависимости от используемого материала стержневого ящика, а также от формы и сложности изготавливаемого оболочечного литейного стержня, стержневая смесь должна обладать определенной текучестью для получения качественной оболочки толщиной от 3 до 10 мм. Литейные стержни с такой толщиной оболочки имеют малые деформации при термическом воздействии. При толщине от 1 до 3 мм оболочка может испытывать сильную деформацию, особенно при неравномерном нагреве ее поверхности. Наполнение из чистого формовочного кварцевого песка препятствует деформации оболочки литейного стержня за счет отвода поступающей от оболочки теплоты в глубь литейного стержня, а также за счет создаваемой дополнительной жесткости объема.

Термическая стойкость экспериментальных образцов песчано-смоляных литейных стержней зависит от массовой доли органического связующего вещества — эпоксидно-диановой смолы марки ЭД-20, что показано на **рис. 1**.

Установлено, что для заполнения оболочечного песчано-смоляного литейного стержня может быть использован как чистый формовочный кварцевый песок, так и обратная стержневая смесь, полученная путем измельчения и переработки выбитых из отливок литейных стержней. Такая возможность является достоинством технологии изготовления оболочечных литейных стержней по сравнению с технологией получения объемных литейных стержней, где традиционно используется чистый формовочный кварцевый песок для приготовления стержневой смеси.

На **рис. 2** и **3** показаны диаграммы разрушения образцов песчано-смоляных литейных стержней с различной массовой долей эпоксидно-диановой смолы марки ЭД-20.



Рис. 1. Экспериментальные образцы песчано-смоляных литейных стержней после термической обработки при различных массовых долях органического связующего вещества – эпоксидно-диановой смолы марки ЭД-20: 1 – 1,5 мас. %; 2 – 2,0 мас. %; 3 – 3,0 мас. %

Fig. 1. Experimental samples of sand-resin cores after heat treatment at different mass fractions of the organic binder such as ED-20 grade epoxy-diane resin: 1 is 1.5 wt %; 2 is 2.0 wt %; 3 is 3.0 wt %

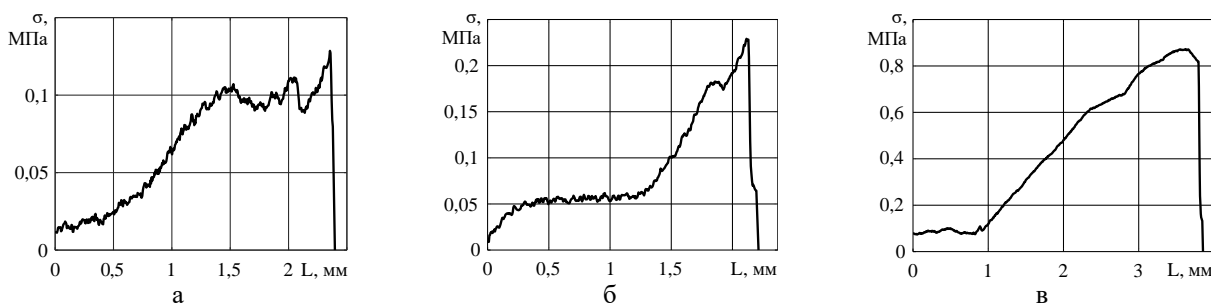


Рис. 2. Диаграммы разрушения при растяжении экспериментальных образцов песчано-смоляных литейных стержней с различными массовыми долями органического связующего вещества в стержневых смесях: а – 1,5 мас. %; б – 2,0 мас. %; в – 3,0 мас. %

Fig. 2. Tensile fracture diagrams of experimental sand-resin cores samples with different mass fractions of the organic binder in core molding mixtures: а is 1.5 wt %; б is 2.0 wt %; в is 3.0 wt %

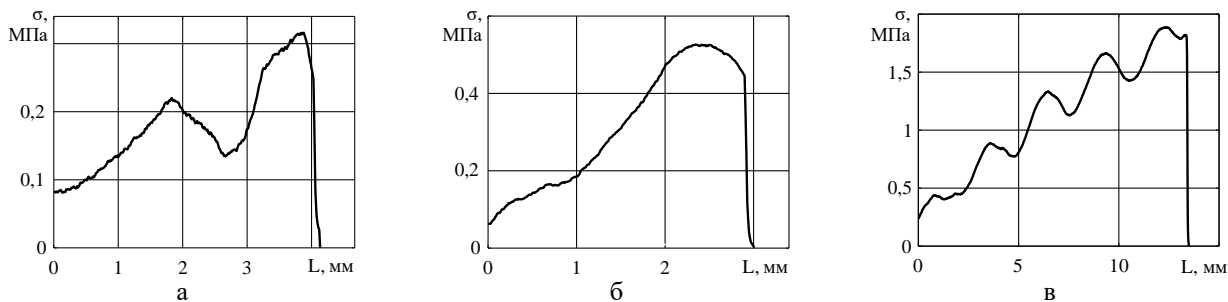


Рис. 3. Диаграммы разрушения при сжатии экспериментальных образцов песчано-смоляных литейных стержней с различными массовыми долями органического связующего вещества в стержневых смесях: а – 1,5 мас. %; б – 2,0 мас. %; в – 3,0 мас. %

Fig. 3. Compressive fracture diagrams of experimental sand-resin cores samples with different mass fractions of the organic binder in core molding mixtures: а is 1.5 wt %; б is 2.0 wt %; в is 3.0 wt %

На диаграммах используются следующие обозначения: σ – механическое напряжение в образце литейного стержня, МПа; L – линейное перемещение привода машины для испытаний материалов на прочность (не соответствует реальному удлинению образца из-за хрупкого разрушения его опорных поверхностей), мм.

Добавление, даже в небольших количествах, менее

10 мас. %, обратной стержневой смеси при изготовлении песчано-смоляных литейных стержней резко снижает их предел прочности в 2–5 раз при растяжении, сжатии и изгибе вследствие содержания углерода, образованного при термическом разложении органического связующего вещества, причем чем больше массовая доля углерода в стержневой смеси, тем более заметно снижается прочность литейного стержня.

Сравнение физико-технических свойств оболочечных песчано-смоляных литейных стержней на органическом связующем веществе – эпоксидной смоле – и оболочечных песчано-жидкостекольных литейных стержней показывает, что пределы прочности при растяжении, сжатии и изгибе могут быть в 1,6–3,8 раза больше у литейных стержней на органическом связующем веществе, что зависит от массовой доли связующего вещества в стержневой смеси. Однако песчано-жидкостекольные литейные стержни обладают значительно большей термической стойкостью, до десяти раз, и меньшим короблением оболочки, до четырех раз, при одинаковой форме литейных стержней и одинаковой толщине их оболочек. Заполнение оборотной стержневой смесью либо формовочным кварцевым песком в обоих случаях позитивно влияет на термическую стойкость оболочечных литейных стержней и уменьшает до двух раз деформацию при термическом воздействии по сравнению с незаполненными литейными стержнями. Выбиваемость оболочечного песчано-смоляного литейного стержня на органическом связующем веществе – эпоксидной смоле – отличная, в то время как выбиваемость оболочечного песчано-жидкостекольного литейного стержня хорошая и может быть улучшена путем погружения отливки в резервуар с водой. При этом массовая доля эпоксидной смолы может находиться в диапазоне 1,5–3,0 мас. %, а массовая доля жидкого натриевого стекла – в диапазоне 6,0–12,0 мас. % при его плотности 1,42 г/см³. При использовании жидкого натриевого стекла другого состава и другой плотности его массовая доля может отличаться. Для улучшения выбиваемости в песчано-жидкостекольную стержневую смесь может быть добавлена измельченная морская ракушка в количестве 5–20 мас. %. Результаты испытаний на пределы прочности экспериментальных образцов песчаных литейных стержней на органическом и неорганическом связующем веществе при растяжении, сжатии и изгибе, а также результаты испытаний на выбиваемость из отливок с использованием пятибалльной шкалы выбиваемости приведены в **таблице**.

Оболочечные песчано-жидкостекольные литейные стержни лучше подходят для изготовления массивных отливок из металлов и металлических сплавов с высокими температурами заливки, в то время как оболочечные песчано-смоляные литейные стержни лучше подходят для литья цветных металлов и их сплавов ввиду меньшей термической стойкости. При термическом разложении связующего вещества в

оболочке песчано-смоляного литейного стержня на органическом связующем веществе – эпоксидной смоле – образуются вредные для здоровья человека и окружающей среды токсичные продукты разложения, в то время как термическое разложение оболочечного песчано-жидкостекольного литейного стержня является безопасным и экологичным. Также следует отметить, что эпоксидно-диановые смолы содержат эпихлоргидрин, который, согласно ГОСТ 12.1.007–76, относится ко II классу опасности по степени вредного воздействия на организм человека. Кроме того, такие смолы могут содержать органический растворитель толуол, который, в соответствии с тем же ГОСТом, относится к III классу опасности. Это обуславливает необходимость строгого соблюдения требований техники безопасности, включая применение средств индивидуальной защиты и организацию вентиляции стержневого участка.

Закключение

Несмотря на широкое применение в мире фурановых смол в качестве связующего вещества при изготовлении оболочечных песчаных литейных стержней, содержание в фурановых смолах формальдегида, оказывающего важное влияние на физико-технические свойства песчаных литейных стержней, ухудшает условия труда в литейном цехе, так как формальдегид имеет резкий запах и вреден для здоровья человека. Поэтому применение эпоксидных смол в качестве связующего вещества при изготовлении оболочечных песчаных литейных стержней является менее вредной для рабочих литейного цеха альтернативой. Оболочечные песчаные литейные стержни обладают лучшими условиями для их извлечения из отливок по сравнению с традиционными объемными песчаными литейными стержнями, что достигается за счет того, что внутренняя полость оболочки оболочечного песчаного литейного стержня заполнена формовочным кварцевым песком без связующего вещества. Такая оболочка в процессе термического разложения связующего вещества разрушается и кварцевый песок покидает внутреннюю полость оболочки вместе с остатками самой оболочки. Таким образом, при изготовлении небольших отливок из алюминиевых литейных сплавов не возникает ситуации, когда объемные песчаные литейные стержни не полностью разрушаются из-за термического разложения связующего вещества.

Таблица. Значения пределов прочности при растяжении, сжатии и изгибе, а также выбиваемости экспериментальных образцов песчано-смоляных литейных стержней на органическом связующем веществе — эпоксидно-диановой смоле марки ЭД-20

Table. Values of tensile, compressive, and flexural strength, as well as knocking-out ability of experimental sand-resin cores samples bound with the organic binder such as ED-20 grade epoxy-diane resin

| Доля связующего вещества, мас. % | Предел прочности при растяжении, МПа | Предел прочности при сжатии, МПа | Предел прочности при изгибе, МПа | Выбиваемость, балл |
|----------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------|
| 1,5 | 0,132 | 0,335 | 0,496 | 1 |
| 2,0 | 0,269 | 0,589 | 1,042 | 1 |
| 3,0 | 0,882 | 1,898 | 1,227 | 2 |

Проведенные экспериментальные исследования возможностей технологии изготовления оболочечных песчано-смоляных литейных стержней на органическом связующем веществе — эпоксидной смоле, а также сравнительный анализ физико-технических свойств таких стержней со свойствами оболочечных песчано-жидкостекольных литейных стержней показали перспективность применения исследуемой технологии в литейном производстве. Оболочечные песчано-жидкостекольные литейные стержни менее технологичны в изготовлении, чем песчано-смоляные оболочечные литейные стержни, что объясняется более длительным временем набора прочности. Несмотря на это, оболочечные песчано-жидкостекольные литейные стержни, внутренняя полость оболочки которых заполнена формовочным кварцевым песком без связующего вещества, могут найти применение при изготовлении отливок из чугуна и стали, так как связующее вещество — жидкое стекло — обладает более высокой термостойкостью, возрастающей при увеличении его массовой доли в стержневой смеси, чем органические связующие вещества. К тому же жидкое стекло при термическом разложении не выделяет токсичных и вредных для здоровья человека веществ, что позволяет улучшить условия труда в литейном цехе и на стержневом участке.

Сформированные рекомендации позволяют обоснованно выбирать материал стержневого ящика, толщину оболочки литейного стержня, а также средний размер частиц формовочного кварцевого песка, что обеспечивает необходимое качество поверхности литейного стержня, манипуляторную и окончательную прочность, термическую стойкость и отличную выбиваемость литейных стержней из отливок цветных и черных металлов и сплавов. Полученные результаты будут способствовать дальнейшему развитию и совершенствованию стержневых процессов в литейном производстве.

Список источников

1. Iron and Steel Castings and Core Production Results from Finer Grades of Chromite Sand in Shell Applications / Steele R., Kerns K., LaFay P., and LaFay V. // *International Journal of Metalcasting*. 2025, vol. 19, pp. 635–642. DOI: 10.1007/s40962-024-01311-x.
2. Innovative Inorganic Binder Systems for the Production of Cores for Non-Ferrous Metal Alloys Reflecting the Product Quality Requirements / Merta V., Beňo J., Obzina T., Radkovský F., Kroupová I., Lichý P., Foltá M., Janovská K., Nguyenová I., and Dostál M. // *Metals*. 2021, vol. 11, article 733. DOI: 10.3390/met11050733.
3. Управление свойствами стержневых смесей, изготовленных по Cold-box-amine-процессу / С.А. Куликов, Ф.И. Рудницкий, В.А. Шумигой, Ю.А. Куликов // *Литье и металлургия*. 2024. № 3. С. 51–56. DOI: 10.21122/1683-6065-2024-3-51-56.
4. Коренюгин С.В., Ровин С.Л. Влияние специальных добавок на физико-механические свойства смесей, используемых для изготовления стержней по cold-box-amine-процессу // *Литье и металлургия*. 2023. № 3. С. 36–40. DOI: 10.21122/1683-6065-2023-3-36-40.
5. Elimination of Casting Defects Induced by Cold Box Cores / Udayan N., Srinivasan M. V., Vaira Vignesh R., and Govindaraju M. // *Materials Today: Proceedings*. 2021, vol. 46, part 10, pp. 5022–5026. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.398.
6. Саначева Г.С., Вострикова Н.М., Дубова И.В. Органические связующие в литейном производстве // *Журнал Сибирского федерального университета. Сер.: Техника и технологии*. 2012. № 5 (7). С. 799–804. URL: <http://journal.sfu-kras.ru/article/9541> (дата обращения: 09.07.2025).
7. Environmental Impact of the Reclaimed Sand Addition to Molding Sand with Furan and Phenol-Formaldehyde Resin – A Comparison / Holtzer M., Daňko R., Kmita A., Drożyński D., Kubecki M., Skrzyński M., and Rocznik A. // *Materials*. 2020, vol. 13 (19), article 4395. DOI: 10.3390/ma13194395.
8. Banganayi F.C., Nyembwe D.K., and Polzin H. Optimisation of an Environmentally Friendly Foundry Inorganic Binder Core Making Process for the Replacement of an Organic Binder // *MRS Advances*. 2020, vol. 5, pp. 1323–1330. DOI: 10.1557/adv.2020.225.
9. Fortini A., Merlin M., and Raminella G. A Comparative Analysis on Organic and Inorganic Core Binders for a Gravity Diecasting Al Alloy Component // *International Journal of Metalcasting*. 2022, vol. 16, pp. 674–688. DOI: 10.1007/s40962-021-00628-1.
10. Characteristic of Core Manufacturing Process with Use of Sand, Bonded by Ecological Friendly Nonorganic Binders / Fedoryszyn A., Daňko J., Daňko R., Aslanowicz M., Fulko T., and Ościłowski A. // *Archives of Foundry Engineering*. 2013, vol. 13 (3), pp. 19–24. DOI: 10.2478/afe-2013-0052.
11. Development of Inorganic Binder Systems to Minimise Emissions in Ferrous Foundries / Daňko R., Kmita A., Holtzer M., Daňko J., Lehms D., and Tapola S. // *Sustainable Materials and Technologies*. 2023, vol. 37, article e00666. DOI: 10.1016/j.susmat.2023.e00666.
12. Eco-Friendly Inorganic Binders: A Key Alternative for Reducing Harmful Emissions in Molding and Core-Making Technologies / Kmita A., Daňko R., Holtzer M., Daňko J., Drożyński D., Skrzyński M., Rocznik A., Gruszka D. R., Jakubski J., and Tapola S. // *International Journal of Molecular Sciences*. 2024, vol. 25 (10), article 5496. DOI: 10.3390/ijms25105496.

References

1. Steele R., Kerns K., LaFay P., and LaFay V. Iron and Steel Castings and Core Production Results from Finer Grades of Chromite Sand in Shell Applications. *International Journal of Metalcasting*. 2025;19:635-642. DOI: 10.1007/s40962-024-01311-x.
2. Merta V., Beňo J., Obzina T., Radkovský F., Kroupová I., Lichý P., Foltá M., Janovská K., Nguyenová I., & Dostál M. Innovative Inorganic Binder Systems for the Production of Cores for Non-Ferrous Metal Alloys Reflecting the Product Quality Requirements. *Metals*. 2021;11:733. DOI: 10.3390/met11050733.
3. Kulikov S.A., Rudnitskiy F.I., Shumigay V.A., Kulikov Yu.A. Control of the properties of core mixtures produced

- by the cold-box-amine process. *Litio i metallurgiya* [Casting and Metallurgy]. 2024;(3):51-56. (In Russ.) DOI: 10.21122/1683-6065-2024-3-51-56.
4. Korenyugin S.V., Rovin S.L. Influence of special additives on the physical and mechanical properties of mixtures used for core making by the cold-box-amine process. *Litio i metallurgiya* [Casting and Metallurgy]. 2023;(3):36-40. (In Russ.) DOI: 10.21122/1683-6065-2023-3-36-40.
 5. Udayan N., Srinivasan M. V., Vaira Vignesh R., and Govindaraju M. Elimination of Casting Defects Induced by Cold Box Cores. *Materials Today: Proceedings*. 2021;46(10):5022-5026. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.398.
 6. Sanacheva G.S., Vostrikova N.M., Dubova I.V. Organic binders in foundry production. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Ser.: Tekhnika i tekhnologii* [Journal of the Siberian Federal University. Series: Engineering and Technologies]. 2012;(5(7)):799-804. URL: <http://journal.sfu-kras.ru/article/9541> (Accessed July 9, 2025). (In Russ.)
 7. Holtzer M., Dańko R., Kmita A., Drożyński D., Kubecki M., Skrzyński M., and Roczniak A. Environmental Impact of the Reclaimed Sand Addition to Molding Sand with Furan and Phenol-Formaldehyde Resin - A Comparison. *Materials*. 2020;13(19). Article 4395. DOI: 10.3390/ma13194395.
 8. Banganayi F. C., Nyembwe D. K., and Polzin H. Optimisation of an Environmentally Friendly Foundry Inorganic Binder Core Making Process for the Replacement of an Organic Binder. *MRS Advances*. 2020;5:1323-1330. DOI: 10.1557/adv.2020.225.
 9. Fortini A., Merlin M., and Raminella G. A Comparative Analysis on Organic and Inorganic Core Binders for a Gravity Diecasting Al Alloy Component. *International Journal of Metalcasting*. 2022;16:674-688. DOI: 10.1007/s40962-021-00628-1.
 10. Fedoryszyn A., Dańko J., Dańko R., Aslanowicz M., Fulko T., and Ościłowski A. Characteristic of Core Manufacturing Process with Use of Sand, Bonded by Ecological Friendly Nonorganic Binders. *Archives of Foundry Engineering*. 2013;13(3):19-24. DOI: 10.2478/afe-2013-0052.
 11. Dańko R., Kmita A., Holtzer M., Dańko J., Lehms D., and Tapola S. Development of Inorganic Binder Systems to Minimise Emissions in Ferrous Foundries. *Sustainable Materials and Technologies*. 2023;37. Article e00666. DOI: 10.1016/j.susmat.2023.e00666.
 12. Kmita A., Dańko R., Holtzer M., Dańko J., Drożyński D., Skrzyński M., Roczniak A., Gruszka D. R., Jakubski J., and Tapola S. Eco-Friendly Inorganic Binders: A Key Alternative for Reducing Harmful Emissions in Molding and Core-Making Technologies. *International Journal of Molecular Sciences*. 2024;25(10). Article 5496. DOI: 10.3390/ijms25105496.

Поступила 24.07.2025; принята к публикации 19.01.2026; опубликована 31.03.2026
Submitted 24/07/2025; revised 19/01/2026; published 31/03/2026

Войтенко Валерий Владимирович – ассистент кафедры микро- и нанoeлектроники, Луганский государственный университет им. В. Даля, Луганск, Луганская Народная Республика, Россия.
Email: valery.voytenko@outlook.com. ORCID 0009-0004-0267-5068.

Медведчук Сергей Адамович – старший преподаватель кафедры цифровых технологий и машин в литейном производстве, Луганский государственный университет им. В. Даля, Луганск, Луганская Народная Республика, Россия.
Email: lguni.lit@yandex.ru.

Брешев Владимир Евгеньевич – доктор технических наук, заведующий кафедрой станков, инструментов и инженерной графики, Луганский государственный университет им. В. Даля, Луганск, Луганская Народная Республика, Россия.
Email: stankiinstrumentygraf@mail.ru.

Войтенко Галина Олеговна – кандидат технических наук, доцент кафедры микро- и нанoeлектроники, Луганский государственный университет им. В. Даля, Луганск, Луганская Народная Республика, Россия.
Email: galinamicroel@mail.ru.

Valery V. Voytenko – Assistant Lecturer at the Department of Micro- and Nanoelectronics, Vladimir Dahl Lugansk State University, Lugansk, Lugansk People's Republic, Russia.
Email: valery.voytenko@outlook.com. ORCID 0009-0004-0267-5068.

Sergey A. Medvedchuk – Senior Lecturer at the Department of Digital Technologies and Machinery in Foundry Production, Vladimir Dahl Lugansk State University, Lugansk, Lugansk People's Republic, Russia.
Email: lguni.lit@yandex.ru.

Vladimir E. Breshev – DrSc (Eng.), Head of the Department of Machinery, Tools, and Engineering Graphics, Vladimir Dahl Lugansk State University, Lugansk, Lugansk People's Republic, Russia.
Email: stankiinstrumentygraf@mail.ru.

Galina O. Voytenko – PhD (Eng.), Associate Professor at the Department of Micro- and Nanoelectronics, Vladimir Dahl Lugansk State University, Lugansk, Lugansk People's Republic, Russia.
Email: galinamicroel@mail.ru.

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 530.1, 621.74

DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-1-40-47



МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА КРЕМНИЯ ПРИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ РАСПЛАВА ЭВТЕКТИЧЕСКОГО СИЛУМИНА В НЕОДНОРОДНОМ ПЕРЕМЕННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Дубский Г.А., Мишенева Н.И., Долгушин Д.М., Нефедьев А.А., Мавринский В.В.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация. В статье описана реализованная на практике физическая задача, связанная с кристаллизацией расплава эвтектического силумина (АК12М2Мг) в переменном неоднородном магнитном поле, генерируемом соленоидальным коротким индуктором. Экспериментально установлено, что при действии на кристаллизующийся расплав любого вида магнитных полей последние изменяют термодинамические и кинетические параметры, описывающие процесс зародышеобразования и их рост при кристаллизации. Результаты исследований показали, что неоднородные магнитные поля существенно диспергируют кремний по объему закристаллизованного слитка. Важную роль в этом играют процессы диффузии и конвекции в кристаллизующемся расплаве эвтектического силумина. Для более глубокого понимания механизмов развития процессов диффузии и конвекции кристаллизующегося расплава эвтектического силумина в переменном неоднородном магнитном поле разработана комплексная математическая модель, которая включает в себя уравнения диффузии, учитывающие концентрационные, термические и полевые потоки избыточного кремния, а также уравнения теплопроводности, уравнения магнитной гидродинамики и электромагнитные уравнения Максвелла. Представлено решение одного уравнения диффузии из системы диффузионных уравнений, обусловленного избыточным кремнием на границе кристалл-расплав. Данное решение позволило рассчитать скорость роста пластин кремния и их толщину.

Ключевые слова: силумин, диффузия, неоднородное переменное магнитное поле, кремний, математическая модель, диффузионные потоки кремния, микроструктура

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 24-22-20013, <https://rscf.ru/project/24-22-20013/>.

© Дубский Г.А., Мишенева Н.И., Долгушин Д.М., Нефедьев А.А., Мавринский В.В., 2026

Для цитирования

Математическое моделирование процессов теплопереноса кремния при кристаллизации расплава эвтектического силумина в неоднородном переменном магнитном поле / Дубский Г.А., Мишенева Н.И., Долгушин Д.М., Нефедьев А.А., Мавринский В.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №1. С. 40-47. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-40-47>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

MATHEMATICAL MODELING OF SILICON HEAT AND MASS TRANSFER PROCESSES DURING CRYSTALLIZATION OF EUTECTIC SILUMIN MELT IN A NON-UNIFORM ALTERNATING MAGNETIC FIELD

Dubsky G.A., Misheneva N.I., Dolgushin D.M., Nefediev A.A., Mavrinsky V.V.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk city, Russia

Abstract. The paper describes a practically implemented physical problem related to the crystallization of a eutectic silumin melt (AK12M2Mg) in a non-uniform alternating magnetic field generated by a short solenoidal inductor. Experimental results demonstrate that the application of magnetic fields of various types to a crystallizing melt alters the thermodynamic and kinetic parameters governing nucleation and the growth of nuclei during crystallization. The research results have demonstrated that non-uniform magnetic fields significantly disperse silicon throughout the volume of the solidified ingot. Diffusion and convection processes occurring in the crystallizing eutectic silumin melt play a crucial role in this effect. For a deeper understanding of the mechanisms governing diffusion and convection in the crystallizing eutectic silumin melt under a non-uniform alternating magnetic field, a comprehensive mathematical model has been developed. This model includes diffusion equations accounting for concentration, thermal, and field-driven fluxes of excess silicon, as well as heat conduction equations, magnetohydrodynamic equations, and Maxwell's electromagnetic equations. A solution to one of the diffusion equations from the system of diffusion equations, associated with excess silicon at the crystal-melt interface, is presented. This solution has made it possible to calculate the growth rate and thickness of silicon plates.

Keywords: silumin, diffusion, non-uniform alternating magnetic field, silicon, mathematical model, silicon diffusion fluxes, microstructure

The study was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation grant No. 24-22-20013, <https://rscf.ru/project/24-22-20013/>.

For citation

Dubsky G.A., Misheneva N.I., Dolgushin D.M., Nefediev A.A., Mavrinsky V.V. Mathematical Modeling of Silicon Heat and Mass Transfer Processes During Crystallization of Eutectic Silumin Melt in a Non-Uniform Alternating Magnetic Field. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 1, pp. 40-47. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-40-47>

Введение

Традиционные способы литья заготовок и изделий в различные формы чаще всего не дают возможности получать отливки с заданной микроструктурой и требуемым объемным распределением примесей и легирующих добавок, что снижает качество получаемых изделий.

В настоящее время в литейном производстве для получения литых заготовок и изделий с заданными технологическими свойствами используют различные способы внешнего силового воздействия на кристаллизующийся в кристаллизаторах расплав металла или сплава. Чаще всего для этой цели используют физические поля, посредством которых воздействуют на кристаллизующийся расплав, не меняя его химический состав. Наибольшее распространение получили различного вида магнитные поля: постоянные; постоянные неоднородные; импульсные и непрерывные синусоидальные.

Результат воздействия этих полей на кристаллизующийся расплав различен. Так, все виды магнитных полей изменяют энергетическое состояние расплава, которое характеризуется термодинамическим

потенциалом Гиббса, величина которого при наличии магнитного поля возрастает при всех температурах расплава [1-3]. Это связано с тем, что энтропия расплава в магнитном поле понижается за счет парамагнетизма Паули, а внутренняя энергия возрастает.

Данное изменение потенциала сдвигает температуру фазового равновесия (S→L) в сторону её увеличения. В связи с чем возрастает температура переохлаждения, связанная с размером критического зародыша, скоростью возникновения центров кристаллизации и их линейной скоростью. Таким образом, с помощью воздействия магнитных полей на кристаллизующийся расплав можно управлять процессами кинетики и термодинамики формирования зёрненной структуры кристаллизующегося слитка. Проведенные исследования в этом направлении описаны в работах [4, 5] и других исследованиях [6, 7]. Совершенно очевидно, что управление термодинамикой и кинетикой на начальном этапе процесса кристаллизации расплава не является достаточным условием формирования технологического слитка, так как возникшие центры кристаллизации должны расти, а для этого необходимо организовать приток дополнительных атомов к

ним из расплава, что осуществляется за счет диффузии или конвективного переноса.

Конечно, возможны и бездиффузионные процессы кристаллизации, но данная статья не о них.

Как показывает практика литья заготовок, диффузионными потоками и конвекцией в кристаллизующемся расплаве можно управлять с помощью скорости его охлаждения. Но при традиционном способе литья в заданную форму скорость охлаждения расплава определяется теплофизическими свойствами формы и практически остается постоянной [8]. В этих условиях влиять на диффузионные и конвективные потоки можно посредством различных по виду магнитных полей, воздействующих на кристаллизующийся расплав.

Так, при использовании импульсных и синусоидальных магнитных полей реализуется индукционный метод возбуждения пондеромоторных магнитных сил, посредством которых возможно заставить определенные объемы жидкого металла двигаться в нужном направлении, то есть осуществить перемещение кристаллизующегося расплава сплава, а также изменить его диффузионные параметры.

Объектом нашего исследования являлся эвтектический силумин АК12М2Мг, кристаллизующийся расплав которого подвергался воздействию различных по виду магнитных полей:

- постоянного неоднородного;
- импульсного;
- переменного (синусоидального).

Как показала практика проведения исследований по выявлению влияния различных по природе магнитных полей на физико-механические свойства указанного силумина, не всегда удается реализовать необходимые экспериментальные методы, позволяющие непосредственно наблюдать модифицирующее действие магнитных полей на интересующие нас свойства [9].

Эти ограничения, как правило, связаны с ограниченными финансовыми возможностями, а также материальными и временными ограничениями. Обнадеживающим методом исследования является метод математического моделирования исследуемого процесса - процесса кристаллизации расплава эвтектического силумина в переменном неоднородном магнитном поле.

Цель данной работы – для теоретического описания диспергирования кремния в кристаллизующемся расплаве силумина в магнитном поле построить математическую модель тепло- и массопереноса, способную связать процесс диспергирования с параметрами действующего переменного неоднородного магнитного поля.

Реализация данной математической модели позволит:

- получить количественные характеристики указанных явлений и процессов, а также рассчитать ход реального процесса;
- выявить скрытые закономерности и предсказать новые эффекты;

– изучить сложные объекты или процессы, над которыми невозможно проведение эксперимента;

– сократить время изучения реального объекта и сроки проектирования нового объекта, снизить материальные затраты.

Стадии и механизмы кристаллизации эвтектического силумина

В эвтектическом силумине кристаллизация фаз происходит в несколько стадий:

1. Выделение первичного кремния. За счёт разности температуры кристаллизации алюминия и кремния кристаллизация кремния начинается первой.

2. Образование зон жидкости алюминия, сильно обеднённых кремнием, вокруг кристаллов первичного кремния. Это создаёт условия для зарождения псевдоперечных зёрен дендритов альфа-твёрдого раствора.

3. Кристаллизация эвтектики. На этой стадии обычно происходит формирование механического раствора алюминиево-кремниевой эвтектики.

Механизмы образования эвтектического силумина следующие:

– рост полной эвтектики происходит за счёт поочерёдной кристаллизации Si и α -фазы. Так, при росте кристаллов α -фазы за счёт ограниченной растворимости кремния в ней кремний оттесняется растущими кристаллами и скапливается около фронта кристаллизации, обогащая кремнием близлежащие слои жидкости;

– при дальнейшем обогащении атомами кремния появляется возможность образования кристалла кремния, от которого впоследствии вырастает вторая пластинка кремния;

– по мере кристаллизации Si вокруг него раствор обогащается атомами алюминия и вновь становится возможным образование кристаллов α -фазы и её кристаллизация с оттеснением атомов кремния на фронт кристаллизации и т.д.

На указанную последовательность кристаллизации очень сильно влияет, например, скорость охлаждения расплава. Так, добавляя или отводя тепло, можно изменить пропорцию между суммарным объёмом кристаллических фаз в эвтектической точке. Но самым существенным фактором, влияющим на процесс формирования структуры эвтектики при заданной температуре охлаждения, является внешнее воздействие на расплав магнитными полями различного вида [10]. Очень важно, что это воздействие не меняет химический состав кристаллизующегося расплава эвтектики.

При кристаллизации эвтектического силумина диффузионные процессы играют существенную роль в формировании фаз. Эти процессы влияют на распределение компонентов между фазами, что определяет форму и размеры кристаллов алюминия и кремния. Исследования в данном направлении до сих пор актуальны.

Математическая модель диспергирования кремния

В данной работе предлагается математическая модель тепло- и массопереноса кремния в кристаллизующемся эвтектическом силумине, находящемся в переменном неоднородном магнитном поле. Магнитное поле создаётся коротким соленоидом, таким, что его высота составляет одну треть высоты тигля с расплавом силумина (рис. 1).

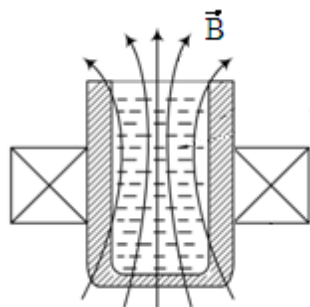


Рис. 1. Упрощённая схема установки, включающая в себя кристаллизатор, совмещенный с аксиальным переменным неоднородным магнитным полем

Fig. 1. A simplified unit scheme that includes a crystalizer combined with an axial non-uniform alternating magnetic field

Данная схема позволяет реализовать наличие неоднородности переменного магнитного поля и создать индукционные токи, взаимодействующие с собственным полем, что порождает пондеромоторные магнитные силы, действующие на кристаллизующийся расплав.

Рост кристалла будем считать неравновесным процессом, тогда одномерная диффузия избытка кремния относительно равновесной в расплаве описывается с учётом независимости каждого вида диффузионного потока следующими уравнениями:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = -\frac{\partial j_i}{\partial x}, \quad i = 1, 2, 3, \dots; \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^s c_i = 1, \quad c_i = \frac{n_i}{n_0}. \quad (2)$$

$S < x < L$, $t > 0$ на границе фронта кристаллизации, где

$$j_i = -D_i \left[\frac{\partial c_i}{\partial x} \pm \frac{D_{Ti}}{TD_i} \frac{\partial T}{\partial x} \pm \frac{\chi}{2\mu_0 kT} \frac{\partial (B^2)}{\partial x} \right]. \quad (3)$$

Для решения этой задачи дополнительно необходимы уравнения теплопереноса на фронте кристаллизации и уравнения электродинамики для расчёта $grad(B^2)$.

Проанализируем указанные в (3) диффузионные потоки, возникающие на фронте кристаллизации в одномерном случае.

1. Концентрационный диффузионный поток избыточного кремния на фронте кристаллизации n_i :

$$j_n = -D_i \frac{\partial n_i}{\partial x}, \quad (4)$$

где D_i – коэффициент диффузии кремния; n_i – концентрация кремния на фронте кристаллизации.

2. Термодиффузионный поток избытка кремния относительно его равновесной концентрации в расплаве:

$$j_T = -\frac{D_{Ti}}{T} \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (5)$$

где D_{Ti} – коэффициент термодиффузии; $\frac{\partial T}{\partial x}$ – градиент температуры вблизи фронта кристаллизации.

3. Поток, обусловленный действием неоднородности переменного магнитного поля [5] за счёт градиента квадрата индукции магнитного поля:

$$j_B = \pm D_i \frac{\chi}{2\mu_0 kT} grad(B^2), \quad (6)$$

где χ – магнитная восприимчивость расплава; μ_0 – магнитная постоянная.

При реализации всех перечисленных механизмов диффузии в нужном направлении, без учёта стимулированной переменным магнитным полем конвекции, суммарный поток интересующих нас атомов (ионов) будет:

$$j = -D_i \left(\frac{\partial n}{\partial x} \pm \frac{D_{Ti}}{TD_i} \frac{\partial T}{\partial x} \pm \frac{\chi}{2\mu_0 kT} grad(B^2) \right), \quad (7)$$

где $D_i = D_0 e^{-\frac{Q_i}{kT}}$ – коэффициент концентрационной диффузии; Q_i – энергия активации диффузии.

Наличие двух знаков (\pm) перед коэффициентом диффузии $D_B = \pm \frac{D_i \chi}{2\mu_0 kT}$ связано с тем, что диффундирующие ионы (атомы) могут быть как парамагнитными, так и диамагнитными. Первые – втягиваются полем, а вторые – выталкиваются из него.

Термодиффузия примечательна тем, что не только величина, но и знак коэффициента термодиффузии D_{Ti} зависит от характера взаимодействия атомов (ионов) расплава между собой.

Это связано с тем, что сечение взаимодействия диффундирующих ионов (атомов) в расплаве зависит от относительной скорости растворителя, то есть $\sigma = \sigma(v)$, а это приводит к тому, что средняя длина

свободного пробега растворённых атомов есть функция скорости:

$$\lambda(v) = \frac{1}{n_0 \sigma(v)}. \quad (8)$$

Пусть функция распределения растворённых атомов – $f(v, \tau)$, где $\tau = \tau(x)$ – параметр, который зависит от координаты x .

Тогда поток этих частиц через плоскость $x = 0$ будет

$$\delta j = -\frac{1}{3} \frac{v}{n_0 \sigma} \frac{\partial(n, f)}{\partial x} \cdot dv. \quad (9)$$

После интегрирования получим

$$j = -\frac{1}{3} \frac{v}{n_0} \frac{\partial}{\partial x} \left(n \left\langle \frac{v}{\sigma} \right\rangle \right), \quad (10)$$

где угловые скобки обозначают усреднение по распределению Максвелла атомов (ионов) в перегретом расплаве.

Полагая, что $C_i = \frac{n_i}{n_0} = \text{const}$, получим

$$j_T = -\frac{C_i T}{3} \frac{d}{dT} \left\langle \frac{v}{\sigma T} \right\rangle \frac{dT}{dx}, \quad (11)$$

где

$$D_T = -\frac{C_i T^2}{3n_0} \frac{d}{dT} \left\langle \frac{v}{\sigma T} \right\rangle. \quad (12)$$

Проанализируем знак D_T в формуле (12).

Пусть $\sigma \sim \frac{1}{v^\beta}$.

1. При $\beta < 1$ (или равно нулю, если считать, что атомы в расплаве твёрдые шарики) $D_T < 0$.

Поток частиц направлен по $\left(\frac{dT}{dx}\right)$.

2. При $\beta > 1$ (например, для электронов или ионов в плазме $v \sim \frac{1}{r}$, а $\sigma \sim \frac{1}{v^4}$) имеем $D_T > 0$ и поток частиц направлен против градиента температуры.

3. При $\beta = 0$, $\frac{v}{\sigma T} \rightarrow 1$ и $D_T \rightarrow 0$.

Поскольку термодиффузионный поток атомов (ионов) пропорционален градиенту температуры, то он существенен только в начале кристаллизации, но по мере роста закристаллизованного слоя $\frac{\partial T}{\partial x}$ – убывает и термодиффузия также убывает, не внося, по видимому, существенного вклада в общий диффузионный поток, особенно на позднем этапе кристаллизации слитка.

Если считать, что указанные в данной математической модели диффузионные потоки зависимы и есть перекрестные компоненты, то аналитического решения предлагаемой совокупности систем уравнений, скорее всего, получить вряд ли возможно.

Однако если допустить, что указанные потоки (4)-(6) независимы, то есть каждый протекает так, как бы других нет, то задачу возможно решить для каждого потока, а далее просуммировать их действие на механизм отвода избыточного кремния от фронта кристаллизации.

Исходя из указанного допущения, нестационарный процесс диффузии кремния от фронта кристаллизации к расплаву можно описать следующей системой уравнений для одномерного случая:

$$\frac{\partial c_{in}}{\partial t} = D_i \frac{\partial^2 c_m}{\partial x^2}, \quad (13.1)$$

$$\frac{\partial c_{iT}}{\partial t} = \frac{D_T}{T} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (13.2)$$

$$\frac{\partial c_{iB}}{\partial t} = \frac{D_i \cdot \chi}{2\mu_0 kT} \frac{\partial^2 (B^2)}{\partial x^2}, \quad (13.3)$$

где $c_i = c_{in} + c_{iT} + c_{iB} = 1$ – избыток кремния (относительно концентрации в расплаве c_∞) на фронте кристаллизации $x = \xi(t)$; C_{in} – избыток концентрации кремния вблизи фронта кристаллизации; D_i – коэффициент диффузии в расплаве.

Схема распределения концентрации кремния в системе кристалл-расплав силумина АК12М2Мг представлена на рис. 2. Фронт кристаллизации плоский.

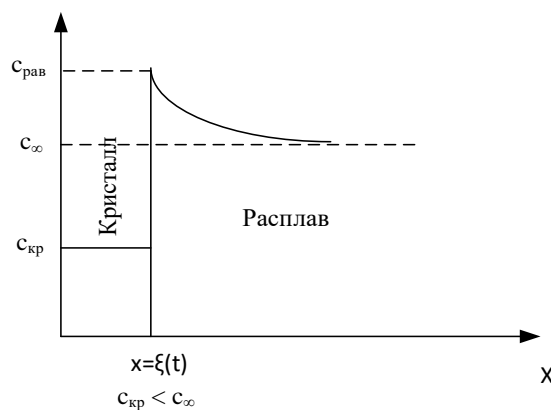


Рис. 2. Зависимость концентрации кремния от координаты в системе кристалл-расплав с плоским фронтом кристаллизации

Fig. 2. Dependence of silicon concentration on coordinate in a crystal-melt system with a flat crystallization front

Концентрационная составляющая диффузии кремния от фронта кристаллизации из расплава описывается уравнением (13.1) с граничными условиями:

$$1) \lim_{x \rightarrow \infty} c_i(x, t) = c_\infty; \quad (14)$$

$$2) c_i(\xi(t), t) = c_{rav}; \quad (15)$$

$$3) c_i(x < \xi(t), t) = c_{kr}, \quad (16)$$

где $\xi(t)$ – координата движущейся границы формирующейся кремниевой пластины.

Решение данной задачи имеет следующий вид:

$$c_i(x, t) = c_\infty + (c_{rav} - c_\infty) \times \frac{2\sqrt{D_i t} \cdot e^{-\frac{x^2}{4D_i t}} - \sqrt{\pi} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_i t}}\right)}{\frac{1}{\beta} e^{-\beta^2} - \sqrt{\pi} \cdot \operatorname{erfc}(\beta)}, \quad (17)$$

где $\xi(t) = 2\beta\sqrt{D_i t}$; $\beta = \text{const}$.

Аналогичное решение приводится в работе [6]. Постоянная β есть корень трансцендентного уравнения:

$$F(\beta) = 2\beta^2 \left(1 - \sqrt{\pi} e^{\beta^2} \cdot \operatorname{erfc}(\beta)\right) = \frac{c_{rav} - c_\infty}{c_{rav} - c_{kr}} = k, \quad (18)$$

где $\operatorname{erfc}(\beta) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_\beta^\infty e^{-\eta^2} d\eta$ – табулированная функция.

График функции (18) приведён на рис. 3.

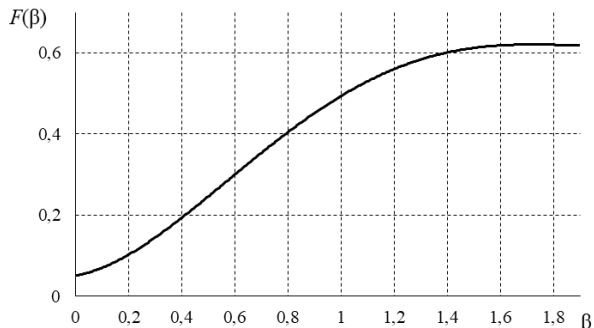


Рис. 3. График зависимости $F(\beta)$

Fig. 3. Dependence graph $F(\beta)$

Для примера проведём расчёты скорости роста кремниевое зерна (пластины) при скорости охлаждения $\frac{dT}{dt} = 1,1 \frac{\text{град}}{\text{с}}$, реализуемой в эксперименте при получении термографической кривой плавления-охлаждение.

$$v(t) = \frac{d\xi(t)}{dt} = \frac{\beta\sqrt{D_i}}{\sqrt{t}}. \quad (19)$$

Коэффициент диффузии кремния в расплаве алюминия $D_i \approx 5 \cdot 10^{-8} \left(\frac{\text{м}}{\text{с}}\right)$, $k = \frac{c_{rav} - c_\infty}{c_{rav} - c_{kr}} \approx 0,2$, тогда

$$v(t) = \frac{0,15 \cdot 2,24 \cdot 10^{-4}}{\sqrt{t}} \approx 3 \cdot 10^{-5} \text{ м/с.}$$

Толщина пластинки («иголки») кремния будет $\xi = v(t) \cdot t \approx 30 \cdot 10^{-6} \text{ м}$.

Экспериментальные измерения средней толщины «иголок» (торцов пластин) на фотографиях шлифов даёт $\xi_{\text{exp}} \approx 20 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, что находится в хорошем согласии с теоретическим расчётом.

Следующее уравнение из системы уравнений (13) описывает изменение термодиффузионного потока в пространстве и времени. Учитывая, что уравнение теплопроводности для одномерного случая

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (20)$$

уравнение (13.2) можно представить в следующем виде:

$$\frac{\partial c_{ir}}{\partial t} = \frac{D_{ir}}{Ta} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (21)$$

где a – температуропроводность жидкой фазы.

Из (21) следует, что

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(c_{ir} - \frac{D_{ir}}{a} \ln T \right) = 0, \quad (22)$$

то есть выражение в скобках не зависит от времени остывания расплава. Таким образом, изменение концентрации кремния вблизи фронта кристаллизации определяется только перегревом расплава, а именно

$$\Delta c_{ir} = \frac{D_{ir}}{a} \ln(\Delta T + 1). \quad (23)$$

Исходя из (23), можно сделать следующий вывод: с ростом толщины затвердевшего слитка, температура перегрева расплава падает, а значит, уменьшается термодиффузионный поток.

Третья составляющая общего потока избыточного кремния определяется производной по координате от характера изменения неоднородного магнитного поля вблизи фронта кристаллизации, а временное изменение данной концентрации находится из уравнения (13.3).

В работе [5] была решена задача о поведении B_r и B_z для неоднородного магнитного поля и показаны графически законы изменения индукции магнитного поля по радиусу r и осевой линии z аксиальной цилиндрической системы тигель-индуктор.

Потоки избыточного кремния будут следовать законам изменения $\frac{\partial B_r}{\partial r}$ и $\frac{\partial B_z}{\partial z}$ с учётом того, что ионы кремния диамагнитные – они будут выталкиваться в область уменьшения градиента индукции магнитного поля.

Выводы

1. В пределах сделанных нами допущений разработана математическая модель, позволяющая описать поведение трёх диффузионных потоков различной природы.

2. Решена задача для концентрационной диффузии избыточного кремния вблизи фронта кристаллизации.

3. Следствием данного решения является расчёт скорости формирования кремниевой фазы и толщины кремниевых «иголок».

4. Показано, что термодиффузионный поток избыточного кремния определяется величиной перегрева расплава относительно закристаллизованного слоя.

Дальнейшее развитие предложенной математической модели будет продолжено, так как не описано влияние Θ -пинч-эффекта на рассмотренные диффузионные процессы.

Список источников

1. Вдовин К.Н., Дубский Г.А., Егорова Л.Г. Влияние магнитного поля на процесс кристаллизации алюминиевых расплавов // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2018. № 2. С. 34-42. DOI: 10.17073/0021-3438-2018-2-34-42. EDN YWSJUD.
2. Влияние импульсного магнитного поля при кристаллизации алюминиевых сплавов на физические свойства / К. Н. Вдовин, Г. А. Дубский, В. Б. Деев [и др.] // Металлург. 2019. № 10. С. 69-75. EDN LNOTVU.
3. Воздействие импульсного магнитного поля на расплав парамагнитного металла при кристаллизации / Д.М. Долгушин, Г.А. Дубский, А.А. Нефедьев [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т. 16, № 3. С. 57-66. DOI: 10.18503/1995-2732-2018-16-3-57-66. EDN TBZOTO.
4. Термодинамика и кинетика кристаллизации алюминиевых сплавов в постоянном магнитном поле / М.Б. Аркулис, Г.А. Дубский, Д.М. Долгушин, Н.И. Мишенева // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т. 19, № 1. С. 29-34. DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-1-29-34. EDN VKQTSX.
5. Способ диспергирования кремния в расплаве силумина, кристаллизующегося в неоднородном магнитном поле / Г.А. Дубский, Н.И. Мишенева, Д.М. Долгушин [и др.] // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математика. Механика. Физика. 2025. Т. 17, № 2. С. 82-90. DOI: 10.14529/mmph250209. EDN ILXTPG.
6. Диффузионные процессы в металлах: сборник статей / М-во высш. и сред. спец. образования РСФСР; Тульск. политехн. ин-т. Тула: Изд-во Тульск. политехн. ин-та, 1973.
7. Ефимов В.А., Эльдарханов А.С. Физические методы воздействия на процессы затвердевания сплавов. М.: Металлургия, 1995. 272 с.
8. Дибро И.А. Состояние и перспективы развития производства отливок из алюминиевых сплавов в России // Литейщик России. 2007. № 5. С. 28-29. EDN HZRMOJ.
9. Заббаров Р., Бибииков А.М., Живодеров В.М. Структурные изменения и свойства алюминиевых сплавов, обработанных магнитным полем // Металлургия машиностроения. 2009. № 6. С. 25-27. EDN LABAZH.
10. Ловцов Д.П. Перспективные технологические методы управления качеством отливок // Литейщик России. 2004. № 6. С. 8-10.
11. The Role of Dendrite Arm Spacing in Fatigue of Aluminum Castings / W. Chen [et al.] // Advances in Aluminum Casting Technology. Materials Park : ASM International, 1998.
12. Thévoz P., Desbiolles J.L. & Rappaz M. Modeling of equiaxed microstructure formation in casting // Metall Trans A 20, 1989. 311-322. <https://doi.org/10.1007/BF02670257>

References

1. Vdovin K.N., Dubsky G.A., Egorova L.G. The effect of a magnetic field on the crystallization process of aluminum melts. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Tsvetnaya Metallurgiya* [Izvestiya of higher educational institutions. Non-Ferrous Metallurgy]. 2018;(2):34-42. (In Russ.) DOI: 10.17073/0021-3438-2018-2-34-42. EDN: YWSJUD.
2. Vdovin K.N., Dubsky G. A., Deev V. B. et al. The effect of a pulsed magnetic field during crystallization of aluminum alloys on physical properties. *Metallurg* [Metallurgist]. 2019;(10):69-75. (In Russ.) EDN: LNOTVU.
3. Dolgushin D.M., Dubsky G.A., Nefediev A.A. et al. The effect of a pulsed magnetic field on a paramagnetic metal melt during crystallization. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G. I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018;16(3):57-66. (In Russ.) DOI: 10.18503/1995-2732-2018-16-3-57-66. EDN: TBZOTO.
4. Arkulis M.B., Dubsky G.A., Dolgushin D.M., Misheneva N.I. Thermodynamics and kinetics of crystallization of aluminum alloys in a constant magnetic field. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G. I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021;19(1):29-34. (In Russ.) DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-1-29-34. EDN: VKQTSX.
5. Dubsky G.A., Misheneva N.I., Dolgushin D.M. et al. A method for dispersing silicon in a silumin melt crystallizing in a non-uniform magnetic field. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Matematika. Mekhanika. Fizika* [Bulletin of South Ural State University. Series: Mathematics. Mechanics. Physics]. 2025;17(2):82-90. (In Russ.) DOI: 10.14529/mmph250209. EDN: ILXTPG.
6. *Diffuzionnye protsessy v metallakh: Sbornik statey* [Diffusion processes in metals: collection of articles]. Tula: Tula Polytechnic Institute Publishing House, 1973. (In Russ.)
7. Efimov V.A., Eldarkhanov A.S. *Fizicheskie metody vozdeystviya na protsessy zatverdevaniya splavov* [Physical methods of influencing alloy solidification processes]. Moscow: Metallurgiya, 1995, 272 p. ISBN 5-229-01188-2. (In Russ.)
8. Dibrov I.A. The state and prospects for the development of aluminum alloy casting production in Russia. *Liteish-*

- chik Rossii* [Russian Foundryman]. 2007;(5):28-29. (In Russ.) EDN: HZRMOJ.
9. Zabbarov R., Bibikov A.M., Zhivoderov V.M. Structural changes and properties of aluminum alloys treated with a magnetic field. *Metallurgiya Mashinostroeniya* [Metallurgy in Mechanical Engineering]. 2009;(6):25-27. (In Russ.) EDN: LABAZH.
 10. Lovtsov D.P. Promising technological methods for controlling casting quality. *Liteishchik Rossii* [Russian Foundryman]. 2004;(6):8-10. (In Russ.)
 11. Chen W., et al. The Role of Dendrite Arm Spacing in Fatigue of Aluminum Castings. *Advances in Aluminum Casting Technology*. Materials Park: ASM International, 1998.
 12. Thévoz P., Desbiolles J.L., Rappaz M. Modeling of equiaxed microstructure formation in casting. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 1989;20:311-322. DOI: 10.1007/BF02670257..

Поступила 26.11.2025; принята к публикации 15.01.2026; опубликована 31.03.2026
Submitted 26/11/2025; revised 15/01/2026; published 31/03/2026

Дубский Геннадий Алексеевич – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры физики, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: ftt.magtu@gmail.com, ORCID 0000-0002-7830-0666

Мишенева Надежда Игоревна – старший преподаватель кафедры физики, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
E-mail: misheneva_n@mail.ru. ORCID 0000-0001-5461-8058

Долгушин Денис Михайлович – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой физики, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
E-mail: denisdolgushin@mail.ru. ORCID 0000-0002-2907-2417

Нефедьев Александр Алексеевич – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры физики, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: shuric_xp@mail.ru, ORCID 0009-0005-3863-9808

Мавринский Виктор Викторович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: viktormav@mail.ru, ORCID 0009-0001-7038-9993

Gennady A. Dubsy – PhD (Eng.), Associate Professor, Department of Physics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: ftt.magtu@gmail.com, ORCID 0000-0002-7830-0666

Nadezhda I. Misheneva – Senior Lecturer, Department of Physics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
E-mail: misheneva_n@mail.ru. ORCID 0000-0001-5461-8058

Denis M. Dolgushin – PhD (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Physics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: denisdolgushin@mail.ru. ORCID 0000-0002-2907-2417

Alexander A. Nefediev – PhD (Eng.), Senior Lecturer, Department of Physics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
E-mail: shuric_xp@mail.ru. ORCID 0009-0005-3863-9808

Viktor V. Mavrinsky – PhD (Eng.), Associate Professor, Department of Physics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
E-mail: viktormav@mail.ru. ORCID: 0009-0001-7038-9993

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

METAL FORMING

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.787.4

DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-1-48-59



ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГЕЛИКОИДНОГО УПРОЧНЕНИЯ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЯХ

Зайдес С.А., Ву Куанг Хай

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Аннотация. Актуальность работы. Упрочнение нежёстких цилиндрических элементов (валов и осей) представляет собой сложную технологическую задачу, требующую обеспечения стабильных механических свойств по всей длине при строгом сохранении диаметральных размеров, поскольку чрезмерное радиальное воздействие вызывает изгиб заготовки. Эффективное решение этой проблемы, предложенное в ИРНТУ, заключается в использовании нового метода поверхностного пластического деформирования (ППД) геликоидным инструментом – тороидальным роликом с винтовым профилем, который позволяет повысить уровень напряжённого состояния в зоне деформации без увеличения радиального натяга. **Цель работы.** На основе конечно-элементного анализа определить оптимальные режимы ППД с использованием геликоидного ролика, обеспечивающие максимальное напряжённое состояние в зоне контакта, высокие остаточные сжимающие напряжения и значительную глубину наклёпа упрочняемого материала. **Методика.** С применением программных комплексов для 3D-моделирования (SolidWorks v21) и численного расчёта (Ansys Workbench 19.2) были проведены вычисления, позволившие установить зависимости временных и остаточных напряжений, а также глубины пластической деформации от ключевых параметров процесса геликоидного упрочнения. **Результаты исследования.** На основе анализа результатов конечно-элементного моделирования установлены рациональные режимы геликоидного ППД ($t=0,1$ мм, $s=0,1$ мм/об, $n_{инн} = n_{заг} = 100$ об/мин), обеспечивающие формирование максимально возможного напряженно-деформированного состояния упрочнённых деталей. **Практическая значимость.** Полученные результаты моделирования показывают, что использование геликоидного инструмента при ППД позволяет существенно повысить уровень напряжённого состояния в зоне деформации. Это обеспечивает более глубокое упрочнение материала и улучшение эксплуатационных свойств поверхностного слоя.

Ключевые слова: геликоидный инструмент, временное напряжение, остаточное напряжение, компьютерное моделирование, поверхностное пластическое деформирование, глубина пластической деформации

© Зайдес С.А., Ву Куанг Хай, 2026

Для цитирования

Зайдес С.А., Ву Куанг Хай. Оценка влияния параметров геликоидного упрочнения на распределение напряжений и деформаций в цилиндрических деталях // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №1. С. 48-59. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-48-59>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF HELICOIDAL STRENGTHENING PARAMETERS ON THE STRESS AND STRAIN DISTRIBUTION IN CYLINDRICAL PARTS

Zaydes S.A., Vu Quang Khai

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. Relevance. Strengthening of non-rigid cylindrical components (shafts and axles) represents a complex technological task that requires maintaining stable mechanical properties along the entire length while strictly preserving diametrical dimensions, since excessive radial loading can cause workpiece bending. An effective solution to this problem, proposed at Irkutsk National Research Technical University, involves the use of a new method of surface plastic deformation (SPD) employing a helicoidal tool - a toroidal roller with a helicoidal profile. This tool design makes it possible to increase the stress level in the deformation zone without increasing the radial interference. **Objectives.** The research is aimed at determining the optimal SPD parameters by finite-element analysis when using a helicoidal roller that provide maximum stress state in the contact zone, high residual compressive stresses, and significant work-hardening depth in the strengthened material. **Methods Applied.** Using software packages for 3D modeling (SolidWorks v21) and numerical simulation (ANSYS Workbench 19.2), calculations have been performed that make it possible to determine the relationships between transient and residual stresses, as well as the depth of plastic deformation, and the key parameters of the helicoidal strengthening process. **Results.** Based on the analysis of the finite-element simulation, rational operating parameters for helicoidal SPD have been identified ($t = 0,1$ mm, $s = 0,1$ mm/rev, $n_{oo} = n_{wp} = 100$ rev/m), ensuring the formation of the highest possible stress-strain state in the strengthened components. **Practical Relevance.** The obtained simulation results show that the use of a helicoidal tool during SPD can significantly increase the stress level in the deformation zone. This leads to deeper material strengthening and improved performance characteristics of the surface layer.

Key words: helicoidal tool, temporary stress, residual stress, computer modeling, surface plastic deformation, depth of plastic deformation

For citation

Zaydes S.A., Vu Quang Khai. Assessment of the Influence of Helicoidal Strengthening Parameters on the Stress and Strain Distribution in Cylindrical Parts. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 1, pp. 48-59. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-48-59>

Введение

Среди разнообразных методов упрочнения деталей машин особое место занимают способы поверхностного пластического деформирования (ППД), которые используют для повышения надёжности деталей машин и транспортно-технологической техники [1].

По сравнению с традиционными методами поверхностного упрочнения, такими как термическая, химико-термическая, лазерная обработка или нанесение покрытий, поверхностное пластическое деформирование обладает рядом существенных преимуществ [2]. Метод обеспечивает упрочнение без заметного увеличения размеров и без риска коробления при формировании упрочнённого слоя за счёт собственных резервов пластичности материала. Кроме того, ППД характеризуется высокой производительностью и экономичностью, не требуя энергоёмких печей, сложных технологических циклов или применения дорогостоящих материалов [3, 4].

На практике наиболее широко применяют способы, основанные на обкатывании и раскатывании шариковыми и роликовыми обкатниками. Тороидальные

ролики представляют собой высокоэффективные рабочие элементы в процессах поверхностного пластического деформирования. Их использование позволяет формировать упрочнённый приповерхностный слой и снижать микронеровности благодаря регулируемому воздействию вращающихся контактных поверхностей [5, 6]. Тороидальные ролики достаточно просты по конструкции, а эффективность упрочнения зависит от технологических параметров и геометрии инструмента: контактное давление (величина прижима), радиус ролика, профиль ролика, число проходов, подача, относительная скорость и технологическая смазка [7, 8].

Для упрочнения осей и валов, представляющих собой нежёсткие цилиндрические детали, необходимо учитывать несколько технологических аспектов. Основная проблема заключается в достижении равномерных механических свойств по длине детали и сохранении точности размеров, особенно диаметральных. Одним из возможных подходов является повышение напряжённого состояния в зоне деформации, не увеличивая при этом радиальный натяг, кото-

рый может вызвать деформацию заготовки во время обработки [9, 10].

В настоящее время для решения этой задачи разработаны различные способы поверхностного пластического деформирования, которые включают в себя применение инновационных конструкций инструментов и более сложные кинематические схемы. Эти подходы позволяют улучшить технологический процесс и повысить эффективность упрочнения [11–13]. В исследовании [11] предложен новый инструмент, представляющий собой двухрадиусный ролик с реверсивным движением. Эта конструкция способствует улучшению механических свойств упрочнённого слоя, увеличивая интенсивность напряжений в зоне деформации и создавая остаточные сжимающие напряжения в поверхностном слое деталей машин. В монографии [12] представлены технологические процессы ППД на основе новых кинематических схем упрочнения: маятниковое, осциллирующее, орбитальное, которые повышают эффективность упрочнения нежестких деталей.

Авторами статьи разработан новый метод и рабочий инструмент для поверхностного пластического деформирования, использующие геликоидный рабочий инструмент [13]. Этот инструмент представляет собой тороидальный ролик с винтовым профилем деформирующего элемента.

Основная цель данного исследования заключается в определении оптимальных технологических режимов обработки процесса поверхностного пластического деформирования с использованием геликоидного инструмента на основе результатов конечно-элементного моделирования. Это позволит обеспечить максимальное напряжённое состояние в зоне

деформации, добиться максимальных остаточных сжимающих напряжений и оптимальной глубины наклёпа в упрочнённых деталях.

Схема геликоидного ППД

Новый способ ППД поясняется на рис. 1, где показана конструкция геликоидного инструмента, выполненного в виде винтовой поверхности, состоящей из двух витков с профильным радиусом $r_{пр}$ и шагом h . Витки расположены под углом к оси инструмента в горизонтальной плоскости, а ось инструмента расположена параллельно оси заготовки. Кинематику процесса определяют следующие основные параметры: радиальный натяг t , частота вращения инструмента $n_{ин}$, частота вращения заготовки $n_{заг}$ и продольная подача s , направление витков и направление подачи.

Ранее проведенные результаты моделирования показали, что схема геликоидного поверхностного пластического деформирования, при которой рабочий инструмент имеет правое направление витка, а направление подачи совпадает с направлением его движения, направление вращения инструмента противоположно направлению вращения заготовки и является самой эффективной схемой упрочнения.

Основная идея способа ППД заключается в следующем: заготовка 2 устанавливается на токарно-винторезном станке, фиксируется в трёхкулачковом патроне и поддерживается вращающимся центром задней бабки (см. рис. 1). Заготовка вращается с частотой $n_{заг}$ (об/мин). Инструмент 1 одновременно получает радиальный натяг t , продольную подачу s и вращается вокруг своей оси с частотой $n_{ин}$.

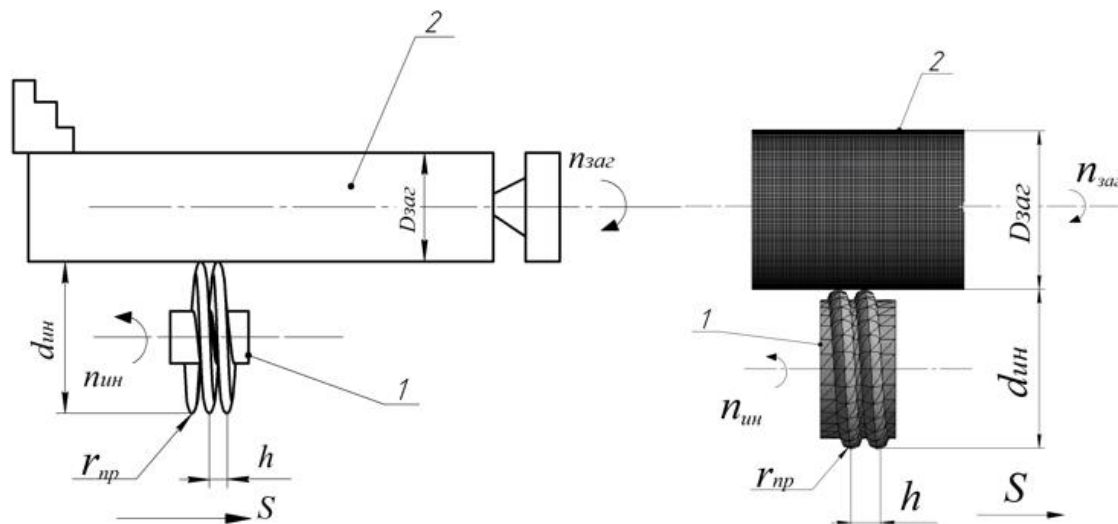


Рис. 1. Кинематическая схема геликоидного ППД и конечно-элементная модель деформирования цилиндрической заготовки: 1 – рабочий инструмент; 2 – обрабатываемая заготовка; $r_{пр}$ – профильный радиус; $d_{ин}$ – диаметр инструмента; $D_{заг}$ – диаметр заготовки; h – шаг витка инструмента

Fig. 1. Kinematic diagram of helical surface plastic deformation and finite element model of cylindrical workpiece deformation: 1 is working tool; 2 is workpiece; r_{pr} is profile radius; d_{tool} is tool diameter; D_{wp} is workpiece diameter; h is tool thread pitch

Конечно-элементное моделирование напряжённого состояния упрочнённых деталей

Для анализа напряжённого состояния поверхностного слоя при различных методах ППД, а также для оценки остаточных и временных напряжений и толщины упрочнённого слоя используется метод конечных элементов (МКЭ). Одной из наиболее распространённых программ для этих целей является ANSYS [14, 15]. Для численного моделирования напряженно-деформированного состояния при ППД была построена геометрическая модель, состоящая из цилиндрической заготовки и инструмента с винтовой поверхностью (см. рис. 1). Заготовка имеет диаметр $D_{\text{заг}} = 30$ мм и выполнена из стали Ст 45 с упругопластическими характеристиками: модуль упругости $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$. Диаграмма деформации материала является билинейной (предел текучести $\sigma_T = 360$ МПа, модуль упрочнения $E_T = 1,45 \cdot 10^3$ МПа, предел прочности $\sigma_b = 600$ МПа). Инструмент принят как абсолютно жёсткий, диаметром $d_{\text{ин}} = 30$ мм, с винтовой поверхностью и шагом $h = 5$ мм и радиусом скругления на рабочей поверхности $r_{\text{пр}} = 2$ мм.

С использованием CAD/CAE-системы Ansys 19.2 была создана конечно-элементная модель цилиндрического образца с тетраэдрической формой конечных элементов, размер ячеек составил 0,5 мм. Коэффициент трения в зоне контакта принят равным $f = 0,1$. Моделирование процесса геликоидного ППД проводилось с использованием основных режимов упрочнения, которые представлены в таблице.

Таблица. Основные режимы упрочнения геликоидным ППД

Table. Main hardening modes of helicoidal surface plastic deformation (SPD)

| $n_{\text{заг}}$, об/мин | $n_{\text{ин}}$, об/мин | t , мм | s , мм/об |
|---------------------------|--------------------------|----------|-------------|
| 100 | 100 | 0,1 | 0,1 |

Для оценки напряжённого состояния в различных точках цилиндрических образцов были определены главные компоненты тензора напряжений вдоль осей Oz (осевые σ_z), Oy (тангенциальные σ_ϕ) и Ox (радиальные σ_r). Остаточное напряжённое состояние в каждой точке материала оценивалось через интенсивность напряжения $\sigma_i^{\text{ост}}$, рассчитанную по формуле [16]

$$\sigma_i^{\text{ост}} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [(\sigma_z^{\text{ост}} - \sigma_\phi^{\text{ост}})^2 + (\sigma_\phi^{\text{ост}} - \sigma_r^{\text{ост}})^2 + (\sigma_r^{\text{ост}} - \sigma_z^{\text{ост}})^2]}. \quad (1)$$

По аналогической формуле определена и интенсивность временных напряжений $\sigma_i^{\text{вр}}$.

Интенсивность напряжений – это частный случай эквивалентного напряжения, когда прочность материала оценивается по энергетической теории Губера-Мизеса-Генки. Касательные напряжения, которые активно формируются при геликоидном ППД и обеспечивают эффективное деформирование поверхност-

ного слоя, учитываются при расчете главных напряжений в формуле (1). В современных инженерных расчетах это делается автоматически. Программа для каждой точки тела вычисляет тензор напряжений, находит главные напряжения и по ним считает интенсивность напряжений [17].

Результаты моделирования и расчета напряженно-деформированного состояния упрочнённых деталей

Влияние радиального натяга. На рис. 2 показано влияние величины радиального натяга на максимальные осевые и тангенциальные остаточные сжимающие напряжения, а на рис. 3 – влияние радиального натяга на интенсивность максимальных временных и остаточных сжимающих напряжений.

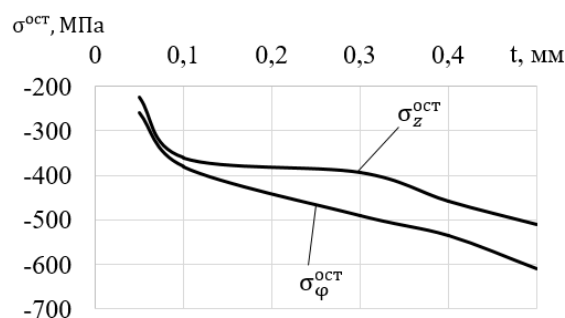


Рис. 2. Влияние радиального натяга на максимальные осевые и тангенциальные остаточные сжимающие напряжения

Fig. 2. Influence of radial interference on maximum axial and tangential residual compressive stresses

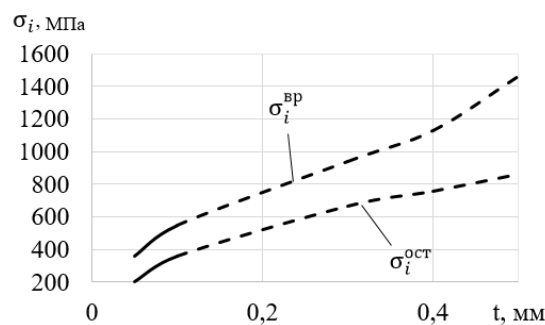


Рис. 3. Влияние радиального натяга на максимальную интенсивность временных и остаточных сжимающих напряжений

Fig. 3. Influence of radial interference on the maximum intensity of transient and residual compressive stresses

Анализ данных, представленных на рис. 2 и 3, позволяет заключить, что при увеличении радиального натяга t от 0,05 до 0,5 мм максимальная интенсивность временных и остаточных сжимающих напряжений возрастает в 4–4,2 раза, в то время как тангенциальные и осевые остаточные напряжения сжатия увеличиваются в 2,3 раза. При значении натяга $t \geq 0,1$ интенсивность временных напряжений превышает предел

прочности материала ($\sigma_b = 600$ МПа), а интенсивность остаточных напряжений – предел текучести материала ($\sigma_T = 360$ МПа), что является недопустимым при ППД, так как приводит к снижению несущей способности деталей. Отсюда следует, что рациональная величина радиального натяга при геликоидном ППД составляет $t = 0,1$ мм, что убедительно согласуется с известными в технологии ППД значениями [18].

Влияние продольной подачи. На рис. 4 показано распределение интенсивности остаточных напряжений по поперечному сечению образцов в зависимости от величины продольной подачи. Из рис. 4 следует, что при весьма малой величине продольной подачи происходит существенный рост остаточных

напряжений, интенсивность которых превышает предел текучести материала. Это происходит благодаря интенсификации временных напряжений при наложении следов обработки. А при большой величине продольной подачи инструмент обрабатывает поверхностный слой с большим шагом, в результате чего степень упрочнения снижается, а неравномерность распределения остаточных напряжений увеличивается.

На рис. 5 показано влияние величины продольной подачи на максимальные осевые и тангенциальные остаточные напряжения, а на рис. 6 – влияние продольной подачи на интенсивность максимальных временных и остаточных сжимающих напряжений.

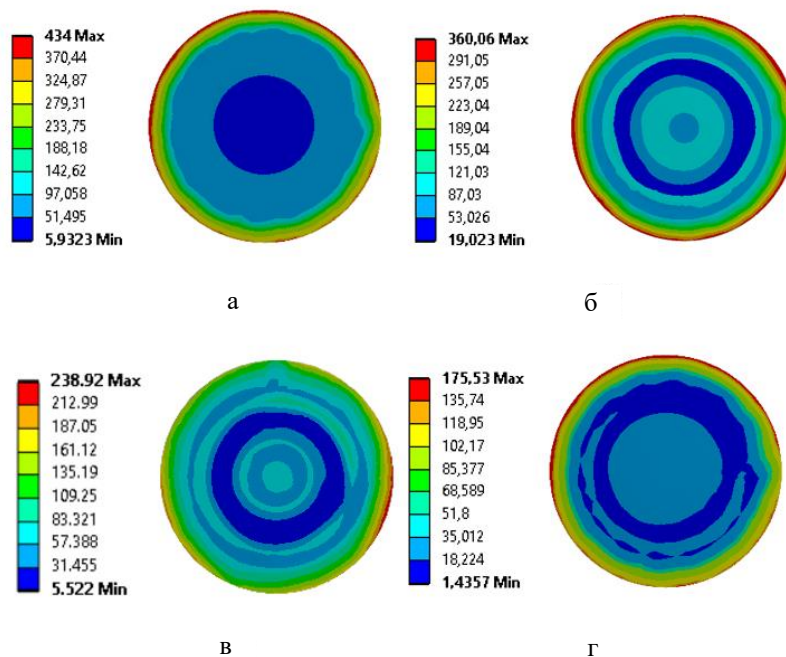


Рис. 4. Распределение интенсивности остаточных напряжений по поперечному сечению деталей при разных значениях продольной подачи s : а – $s = 0,05$ мм/об; б – $s = 0,1$ мм/об; в – $s = 0,2$ мм/об; г – $s = 0,4$ мм/об
 Fig. 4. Residual stress intensity distribution for cross-section of the parts at different longitudinal feed values s : а is $s=0,05$ mm/rev; б is $s=0,1$ mm/rev; в is $s=0,2$ mm/rev; г is $s=0,4$ mm/rev

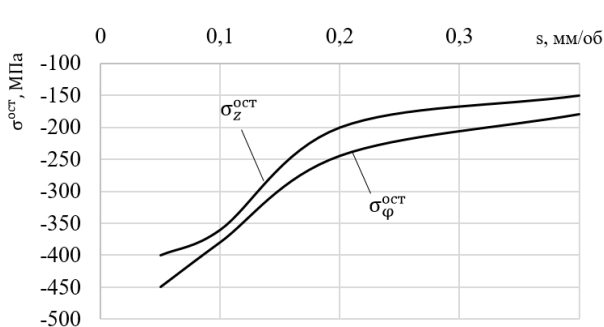


Рис. 5. Влияние величины продольной подачи на максимальные осевые и тангенциальные сжимающие остаточные напряжения
 Fig. 5. Influence of longitudinal feed value on maximum axial and tangential residual compressive stresses

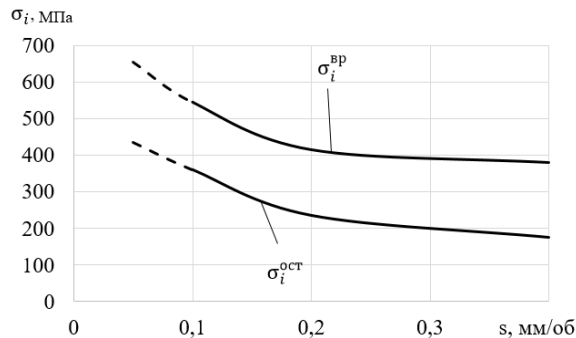


Рис. 6. Влияние величины продольной подачи на интенсивность максимальных временных и остаточных напряжений
 Fig. 6. Influence of longitudinal feed value on the intensity of maximum transient and residual stresses

Анализ данных, представленных на рис. 5 и 6, позволяет сделать вывод, что при увеличении продольной подачи s от 0,05 до 0,4 мм/об максимальная интенсивность временных и остаточных напряжений снижается на 72 и 148% соответственно, в то время как тангенциальные и осевые остаточные напряжения сжатия уменьшаются в 2,50–2,67 раза. При значении подачи $s < 0,1$ мм/об интенсивность остаточных напряжений превышает предел текучести материала ($\sigma_T = 360$ МПа), что является недопустимым для процесса ППД, поскольку это приводит к устранению остаточных напряжений. Следовательно, рациональной величиной продольной подачи является $s = 0,1$ мм/об, что согласуется с общепринятыми режимами обработки в технологии ППД [19].

Влияние частоты вращения рабочего инструмента. Если диаметр заготовки и деформирующего инструмента равны по величине и вращаются в противоположных направлениях, то для гладкого торoidalного ролика это означает, что процесс деформирования происходит в условиях качения в зоне контакта. Геликоидный ролик в аналогичных условиях работает в условиях качения с проскальзыванием за счет винтовой формы деформирующего элемента.

Рассмотрим напряжённое состояние образца при одинаковых скоростях вращения инструмента и заготовки. На рис. 7 представлено влияние частоты вращения рабочего инструмента и заготовки на величину максимальных осевых и тангенциальных остаточных напряжений, в то время как на рис. 8 показано влияние этих параметров на интенсивность временных и остаточных напряжений.

Анализ рис. 7 и 8 показывает, что при повышении частоты вращения инструмента и заготовки с 50 до 400 об/мин наблюдается рост максимальных значений как временных, так и остаточных напряжений: первые увеличиваются примерно на 30%, вторые – на 36%. При этом уровни тангенциальных и осевых остаточных напряжений сжатия также возрастают на 27 и 33% соответственно. Пунктирные кривые на рис. 8 указывают на диапазоны частот, при достижении которых материал находится в критическом состоянии: для остаточных напряжений этим пределом является предел текучести, а для временных – предел прочности при растяжении. Таким образом, рациональная частота вращения инструмента и заготовки составляет 100 об/мин, так как при данной частоте вращения остаточные напряжения достигают величины, близкой к пределу текучести материала ($\sigma_T = 360$ МПа).

Рассмотрим НДС упрочнённых деталей, когда пластическая деформация происходит в условиях скольжения, когда частота вращения заготовки и инструмента разные. Зависимость напряженно-деформированного состояния деталей от частоты вращения рабочего инструмента представлена на рис. 9 и 10. При этом частота вращения заготовки составляет 100 об/мин. На рис. 9 показано влияние частоты вращения рабочего инструмента на величину максимальных осевых и тангенциальных остаточных напряжений. На рис. 10 представлена зависимость интенсивности временных и остаточных напряжений от изменения данного технологического параметра.

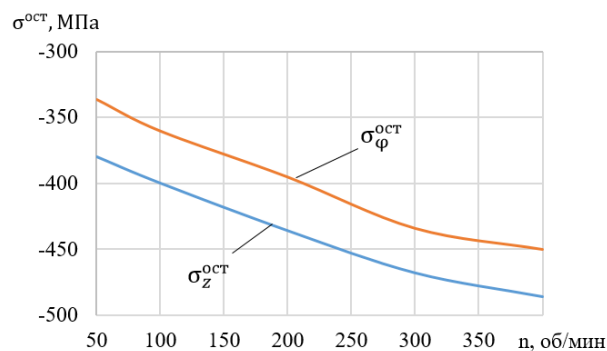


Рис. 7. Влияние частоты вращения рабочего инструмента $n_{ин}$ и заготовки $n_{заг}$ на максимальные осевые и тангенциальные остаточные сжимающие напряжения

Fig. 7. Influence of the rotational speed of the working tool n_{tool} and workpiece n_{wp} on the maximum axial and tangential residual compressive stresses

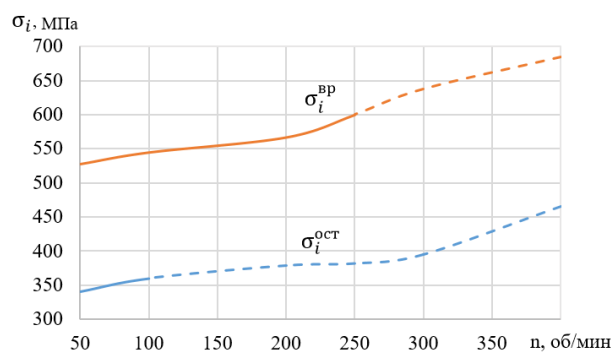


Рис. 8. Влияние частоты вращения рабочего инструмента $n_{ин}$ и заготовки $n_{заг}$ на интенсивность временных и остаточных напряжений

Fig. 8. Influence of the rotational speed of the working tool n_{tool} and workpiece n_{wp} on the intensity of transient and residual stresses

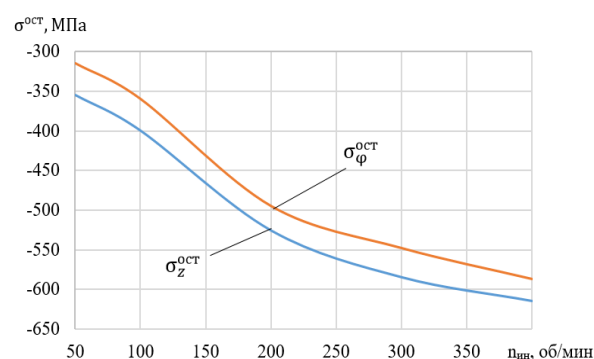


Рис. 9. Влияние частоты вращения рабочего инструмента $n_{ин}$ на предельные значения осевых и тангенциальных остаточных сжимающих напряжений

Fig. 9. Influence of the working tool rotational speed n_{tool} on the limiting values of axial and tangential residual compressive stresses

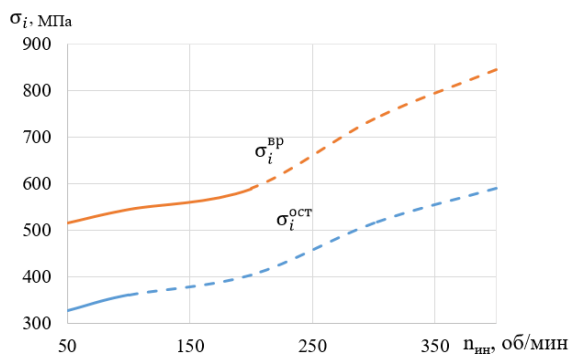


Рис. 10. Зависимость интенсивности временных и остаточных напряжений от частоты вращения рабочего инструмента $n_{инн}$

Fig. 10. Dependence of the intensity of transient and residual stresses on the rotation speed of the working tool n_{tool}

Анализ данных, представленных на рис. 9 и 10, показывает, что при увеличении частоты вращения рабочего инструмента $n_{инн}$ в диапазоне от 50 до 400 об/мин наблюдается рост максимальных значений интенсивности как временных, так и остаточных напряжений на 63 и 80% соответственно. Одновременно с этим величины тангенциальных и осевых остаточных сжимающих напряжений возрастают на 73 и 86%. Установлено, что при $n_{инн} > 100$ об/мин максимальная интенсивность остаточных сжимающих напряжений превышает предел текучести материала ($\sigma_T = 360$ МПа). При дальнейшем увеличении частоты вращения, а именно при $n_{инн} > 200$ об/мин, интенсивность временных напряжений становится выше пре-

дела прочности материала ($\sigma_B = 600$ МПа). Как и следовало ожидать, процесс скольжения сопровождается повышением напряжённого состояния материала заготовки.

Распределение интенсивности остаточных напряжений по поперечному сечению детали в зависимости от частоты вращения рабочего инструмента представлено на рис. 11. По рис. 11, а можно отметить, что при низкой частоте вращения инструмента ($n_{инн} = n_{заг} = 100$ об/мин) интенсивность остаточных напряжений распределяется более равномерно по поперечному сечению образца. В поверхностном слое формируются остаточные напряжения, максимальная интенсивность которых приближена к пределу текучести материала. При относительно высоких скоростях вращения инструмента (рис. 11, б-г) распределение остаточных напряжений становится менее равномерным и в поверхностном слое, и по сечению образцов, что объясняется сложностью механических процессов качения и скольжения, которые происходят не только из-за разных частот вращения заготовки и инструмента, но и за счет винтовой формы деформирующего инструмента. Необходимо отметить, что увеличение частоты вращения инструмента по сравнению с частотой вращения заготовки может привести к снижению равномерности упрочнения и формированию локальных зон концентрации напряжений.

Для оценки однородности распределения остаточных напряжений в поверхностном слое деталей представлены данные численного моделирования (рис. 12), позволяющие проанализировать пространственное распределение интенсивности остаточных напряжений как вдоль оси, так и по периметру поперечного сечения цилиндрической заготовки.

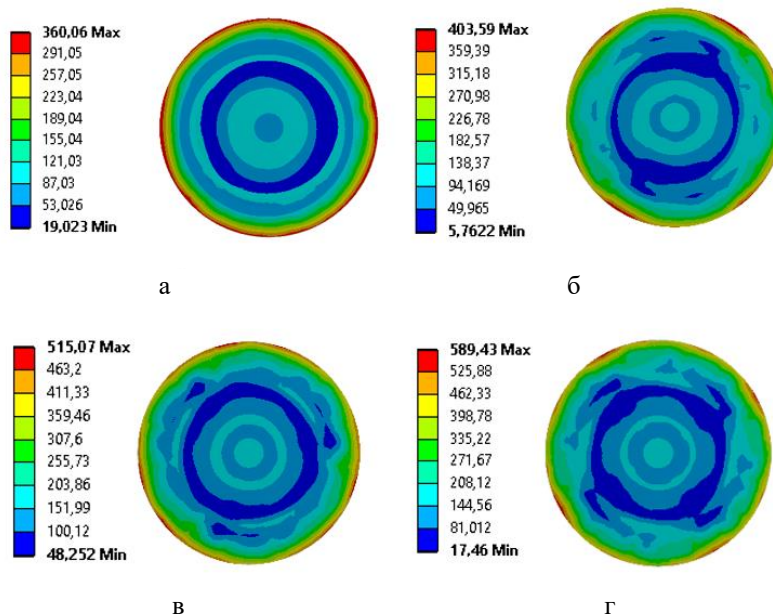


Рис. 11. Распределение интенсивности остаточных напряжений в поперечном сечении детали при разных значениях частоты вращения рабочего инструмента $n_{инн}$: а – $n_{инн} = 100$ об/мин; б – $n_{инн} = 200$ об/мин; в – $n_{инн} = 300$ об/мин; г – $n_{инн} = 400$ об/мин

Fig. 11. Distribution of residual stress intensity for cross-section of the parts at different tool rotation speed n_{tool} : а is $n_{tool} = 100$ rev/min; б is $n_{tool} = 200$ rev/min; в is $n_{tool} = 300$ rev/min; г is $n_{tool} = 400$ rev/min

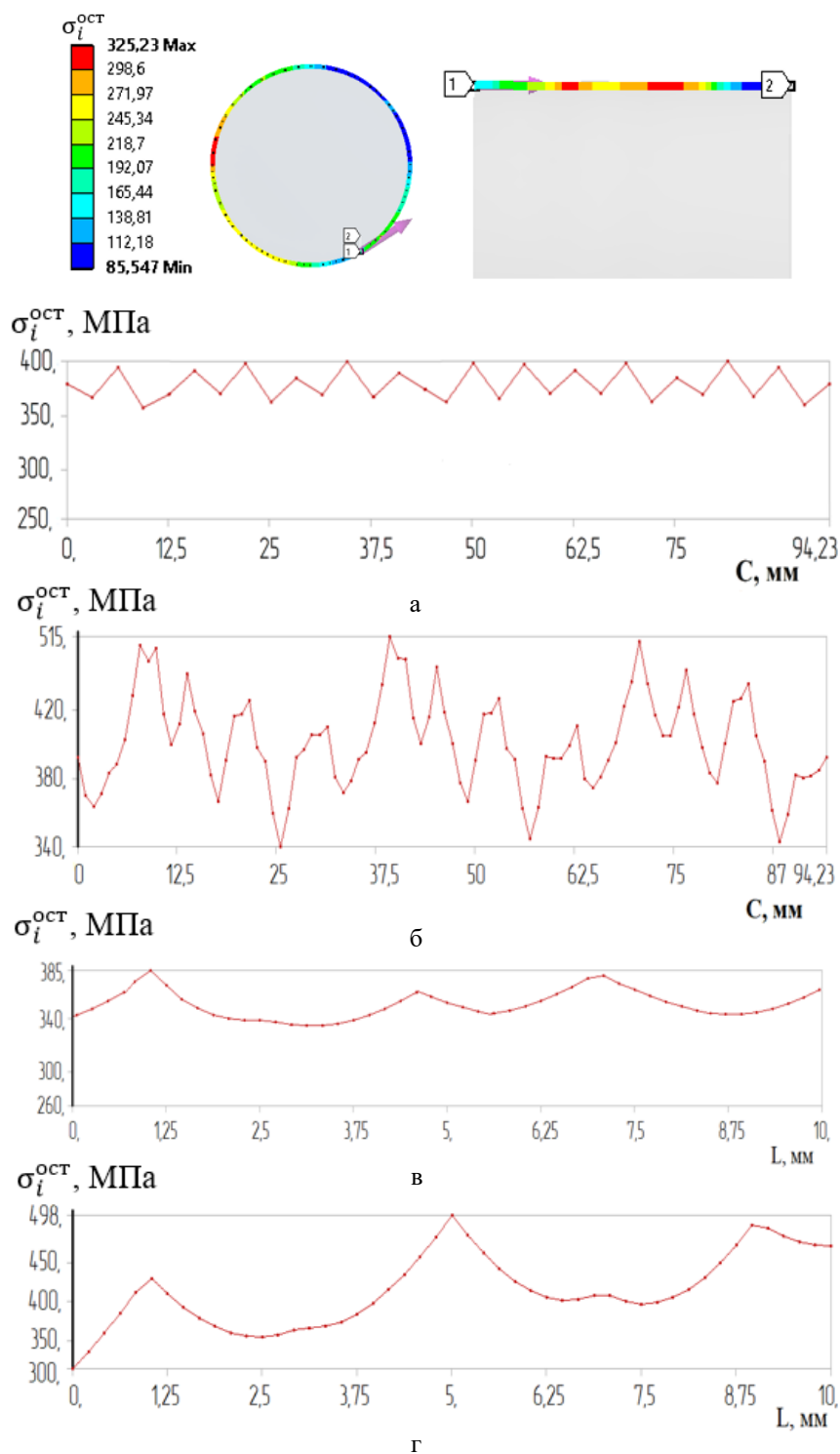


Рис. 12. Распределения интенсивности остаточных напряжений в поверхностном слое по периметру поперечного сечения деталей C и вдоль оси заготовки L при частотах вращения инструмента $n_{\text{ин}} = 100$ мм/об (а, в) и $n_{\text{ин}} = 300$ мм/об (б, г)

Fig. 12. Distributions of residual stress intensity in the surface layer along the perimeter of the cross-section of parts C and along the axis of the workpiece L at tool rotation speed of $n_{\text{tool}} = 100$ mm/rev (а, в) and $n_{\text{tool}} = 300$ mm/rev (б, г)

По рис. 12 можно отметить, что при $n_{ин} = n_{заг} = 100$ мм/об интенсивность максимальных сжимающих остаточных напряжений при этом оказывается меньшей по величине, однако распределяется более равномерно по поверхностному слою. При частоте вращения геликоидного инструмента ($n_{ин} = 300$ об/мин) наблюдается рост величины этих напряжений, но их распределение становится существенно неравномерным как вдоль оси, так и по периметру поперечного сечения образца. Неравномерное распределение остаточных напряжений по поверхности деталей сказывается как на механических, так и эксплуатационных характеристиках.

Влияние частоты вращения заготовки. Зависимость напряженно-деформированного состояния деталей от частоты вращения заготовки представлена на рис. 13 и 14. При этом частота вращения рабочего инструмента составляет 100 мм/об.

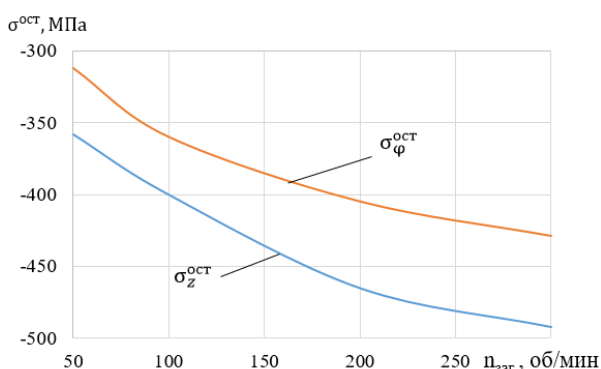


Рис. 13. Влияние частоты заготовки на величину максимальных осевых и тангенциальных сжимающих остаточных напряжений

Fig. 13. The effect of workpiece rotation speed on the magnitude of maximum axial and tangential compressive residual stresses

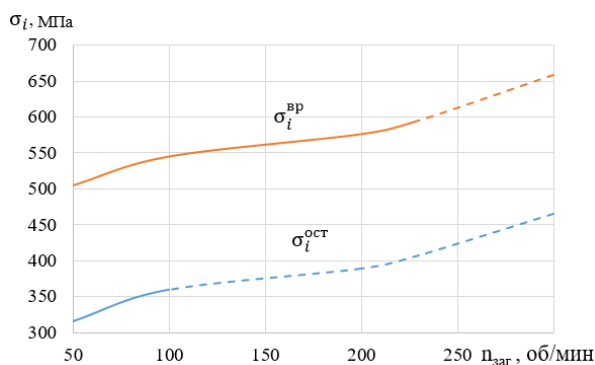


Рис. 14. Влияние частоты вращения заготовки на максимальные значения интенсивности временных и остаточных напряжений

Fig. 14. The effect of the workpiece rotation speed on the maximum values of the intensity of transient and residual stresses

Анализ рис. 13 и 14 показывает, что с увеличением частоты вращения заготовки $n_{заг}$ в пределах от 50

до 300 об/мин максимальные значения интенсивности временных и остаточных напряжений возрастают на 30 и 47% соответственно. При этом максимальные значения тангенциальных и осевых остаточных напряжений сжатия увеличиваются на 37%. Важно отметить, что при частоте вращения $n_{заг} > 230$ об/мин интенсивность временных напряжений почти достигает предела прочности материала заготовки ($\sigma_b = 600$ МПа). Оптимальной частотой вращения как для инструмента, так и для заготовки является 100 об/мин, поскольку при этой частоте остаточные напряжения близки к пределу текучести материала ($\sigma_T = 360$ МПа).

Глубина пластической деформации является ключевым показателем для оценки физико-механических характеристик и эксплуатационных свойств упрочнённых деталей, обработанных при помощи процесса ППД [20].

Под глубиной пластической деформации понимают область в материале, где величина временных напряжений достигает значения предела текучести. Для количественной оценки глубины упрочнённого слоя использованы результаты численного моделирования (рис. 15), основанные на анализе распределения интенсивности пластических деформаций вдоль радиального направления относительно поверхности цилиндрической заготовки [21].

На рис. 15 представлено распределение пластических деформаций по поперечному сечению образца, а на рис. 15, б – кривая, характеризующая распределение интенсивности пластической деформации, что позволяет точно определить глубину упрочнённого слоя.

Рис. 16 иллюстрирует зависимости максимальных временных радиальных напряжений сжатия $\sigma_r^{вр}$ и глубины пластической деформации от параметров геликоидного ППД. Следует отметить, что глубина пластической деформации изменяется в пределах от 1,2 до 3,1 мм в зависимости от режимов обработки и основных параметров процесса ППД.

Необходимо отметить, что на рис. 16 представлены закономерности, важные для оптимизации параметров обработки при поверхностном пластическом деформировании. Можно выделить несколько ключевых моментов: при увеличении радиального натяга, частоты вращения геликоидного инструмента и скорости вращения заготовки наблюдается рост глубины пластической деформации. Так, при изменении радиального натяга с 0 до 0,5 мм глубина пластической деформации возрастает на 81%. При увеличении частоты вращения инструмента с 50 до 400 об/мин глубина деформации увеличивается на 77%. Увеличение частоты вращения заготовки с 50 до 300 об/мин приводит к увеличению глубины пластической деформации на 78%. При снижении продольной подачи с 0,4 до 0,05 мм/об глубина пластической деформации возрастает на 76%.

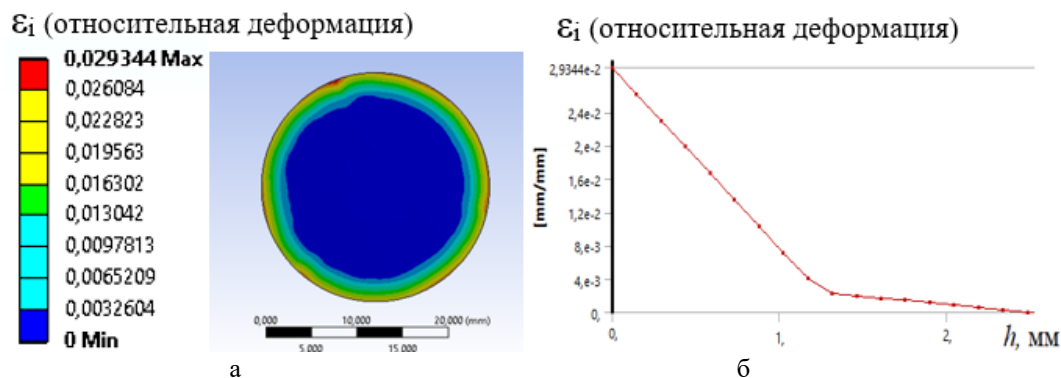


Рис. 15. Распределения интенсивности пластической деформации по поперечному сечению детали (а) и интенсивности пластической деформаций по глубине упрочнённого слоя (б)
 Fig. 15. Distributions of plastic deformation intensity over the cross-section of the part (a) and along the depth of the hardened layer (б)

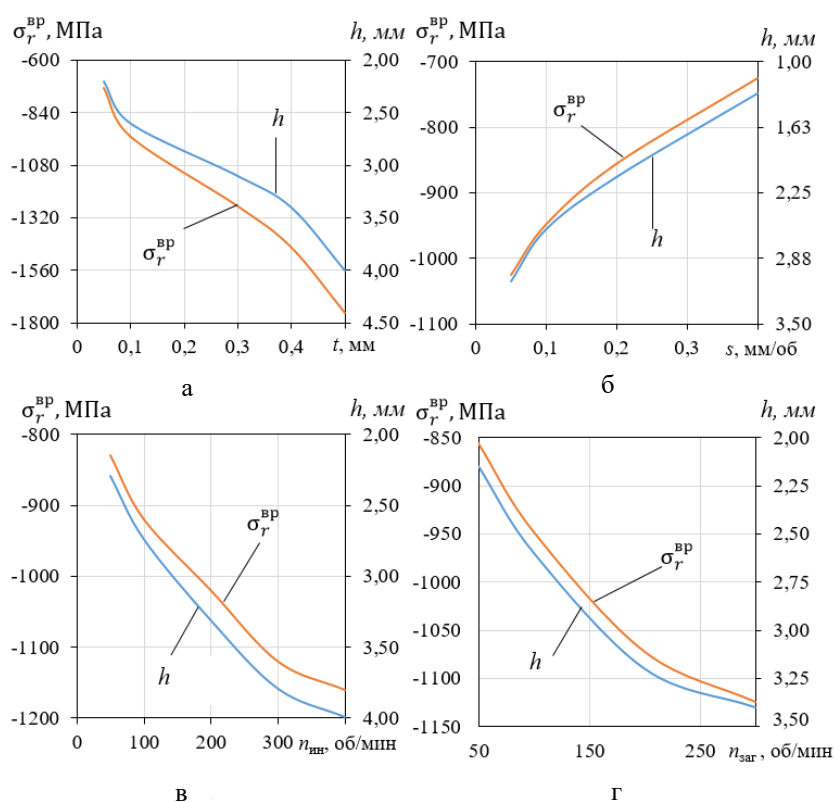


Рис. 16. Влияние основных параметров и режимов обработки на временные радиальные напряжения σ_r^{BP} и глубину пластической деформации h : а – от радиального натяга; б – от продольной подачи; в – от частоты вращения геликоидного инструмента; г – от частоты вращения заготовки
 Fig. 16. Influence of key parameters and processing modes on the transient radial stresses σ_r^{BP} and the depth of plastic deformation h : а is effect of radial interference; б is effect of longitudinal feed rate; в is effect of the rotational speed of the helicoidal tool; г is effect of the rotational speed of the workpiece

Выводы

1. Установлены рациональные режимы геликоидного ППД ($t = 0,1$ мм, $s = 0,1$ мм/об, $n_{инн} = n_{заг} = 100$ об/мин), обеспечивающие формирование максимально возможного напряженно-деформированного состояния упрочнённых деталей.

2. В зависимости от режимов геликоидного упрочнения интенсивность временных напряжений можно увеличить в 4 раза, остаточных напряжений – в 4,2 раза, глубину упрочнённого слоя – на 81%.

3. Установлена частота вращения инструмента и заготовки ($n=100$ об/мин), при которой максимальная

интенсивность временных напряжений не превышает предела прочности, а максимальная интенсивность сжимающих остаточных напряжений – предела текучести материала.

Список источников

1. Кокорева О.Г. Оценка напряжённого состояния при упрочнении поверхностно-пластической деформацией // Журнал передовых исследований в области естествознания. 2021. № 12. С. 4-6. DOI: 10.26160/2572-4347-2021-12-4-6.
2. A review on plastic deformation induced surface/interface roughening of sheet metallic materials / Ning Nie., Lihong Su., Guanyu Deng., Huijun Li., Hailiang Yu., Anh Kiet Tieu // Journal of Materials Research and Technology. 2021, vol. 15, pp. 6574-6607. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.11.087>.
3. Modeling of strengthening mechanisms of surface layers in burnishing process / R. Teimouri, M. Grabowski, R. Bogucki, Ł. Ślusarczyk, S. Skoczypiec // Materials & Design. 2022, vol. 223, 111114. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111114>
4. Зайдес С.А., Ву Куанг Хай. Влияние пространственной ориентации тороидального ролика на напряженно-деформированное состояние цилиндрической заготовки // Упрочняющие технологии и покрытия. 2024. Т. 20. № 11(239). С. 489-495.
5. A Review on Ball, Roller, Low Plasticity Burnishing Process / Priyadarsini Ch., Venkata Ramana V.S.N., Aruna Prabha K., Swetha S. // Materials Today: Proceedings. 2019, vol. 18, part 7, pp. 5087–5099. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.505>
6. Effect of Roller Burnishing and Slide Roller Burnishing on Surface Integrity of AISI 316 Steel: Theoretical and Experimental Comparative Analysis / Maximov J., Duncheva G., Anchev A., Dunchev V., Anastasov K., Daskalova P. // Machines. 2024, vol. 12, 51. <https://doi.org/10.3390/machines12010051>
7. Deep Rolling Techniques: A Comprehensive Review of Process Parameters and Impacts on the Material Properties of Commercial Steels / Noronha D.J., Sharma S., Prabhu Parkala R., Shankar G., Kumar N., Doddapaneni S. // Metals. 2024, vol. 14, 667. <https://doi.org/10.3390/met14060667>
8. Исследование отделочно-упрочняющей обработки методом обкатывания с программным управлением с помощью тороидального ролика / И.О. Зенин, П.Д. Акулиничев, М.А. Альбов и др.// Технология металлов. 2024. № 4. С. 29-37.
9. Mehrzad Boozarpoor, Reza Teimouri. Parametric study of multi-roller rotary burnishing process // International Journal of Lightweight Materials and Manufacture. 2021, vol. 4, issue 2, pp. 179-194. <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2020.10.001>
10. Varga G., Viktoria Ferencsik. Investigation of the Effect of Surface Burnishing on Stress Condition and Hardening Phenomena // Tehnički vjesnik. 2022, vol. 29, no. 4, pp. 1247-1253. <https://doi.org/10.17559/TV-20211110171854>
11. Зайдес С.А., Нгуен Хыу Хай. Процессы поверхностно-пластического деформирования: монография. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2025. 405 с.
12. Зайдес С. А., Хо М.К. Исследование напряженно-деформированного состояния деталей, упрочнённых пластическим деформированием при циклическом нагружении // Вестник машиностроения. 2022. № 8. С. 28-35.
13. Пат. 2824641 С1 Российская Федерация, МПК В24В 39/04. Способ поверхностного пластического деформирования наружных поверхностей тел вращения/ С. А. Зайдес, К. Х. Ву; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет». № 2024106784 ; заявл. 15.03.2024 ; опубл. 12.08.2024.
14. Yadav P.S., Ghatge D.A. Analysis of Optimized Roller Burnishing Parameters Using ANSYS // Advanced Manufacturing and Materials Science. 2018. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76276-0_6
15. Finite Element Analysis of Bearing Structure Based on ANSYS Workbench // Modeling and Simulation. 2023, vol. 12, no. 06, pp. 5737-5750. DOI: 10.12677/mos.2023.126521.
16. Li J, Xu Y, Liu Y. Influence of Initial Yield Strength Weighting on Residual Stresses in Quenched Cylinders Using Finite Element Analysis // Materials. 2024, vol. 17, no. 23, 5833. <https://doi.org/10.3390/ma17235833>
17. A Concept of Thermal Effort for Heat-Induced Metal Plasticity / Dudda W., Ziolkowski P.J., Ziolkowski P., Bryk M., & Badur J. // Materials. 2024, vol. 17, no. 19, 4824. <https://doi.org/10.3390/ma17194824>
18. Зайдес С.А., Хо М.К. Маятниковое поверхностное пластическое деформирование цилиндрических заготовок // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2022. Т. 65, № 5. С. 344-353.
19. Rotella G, Caruso S, Del Prete A, Filice L. Prediction of Surface Integrity Parameters in Roller Burnishing of Ti6Al4V // Metals. 2020, vol. 10, no. (12), 1671. <https://doi.org/10.3390/met10121671>
20. Особенности формирования глубины упрочнения при обработке деталей поверхностным пластическим деформированием/ Отений Я.Н., Привалов Н.И., Щеголев Н.Г и др. // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 12-3. С. 452-455.
21. Отений Я.Н. Влияние параметров деформирующих роликов на геометрию контакта и глубину упрочнения при обработке ППД валов и отверстий // Упрочняющие технологии и покрытия. 2006. № 4(16). С. 8-10.

References

1. Kokoreva O.G. Assessment of the stress state during strengthening by surface-plastic deformation. *Zhurnal peredovykh issledovaniy v oblasti estestvoznaniia* [Journal of advanced research in natural sciences]. 2021;(12):4-6. doi: 10.26160/2572-4347-2021-12-4-6. (In Russ.)
2. Ning Nie., Lihong Su., Guanyu Deng., Huijun Li., Hailiang Yu., Anh Kiet Tieu. A review on plastic deformation induced surface/interface roughening of sheet metallic materials. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021;15:6574-6607. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.11.087>.
3. Teimouri R., Grabowski M., Bogucki R., Ślusarczyk Ł., Skoczypiec S. Modeling of strengthening mecha-

- nisms of surface layers in burnishing process. *Materials & Design*. 2022;223:111114. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111114>
4. Zaydes S.A., Vu Quang Khai. Influence of spatial orientation of a toroidal roller on the stress-strain state of a cylindrical workpiece. *Uprochniiaushchie tekhnologii i pokrytiia* [Strengthening technologies and coatings]. 2024;20(11(239)):489-495. (In Russ.)
 5. Priyadarsini Ch., Venkata Ramana V.S.N., Aruna Prabha K., Swetha S. A review on ball, roller, low plasticity burnishing process. *Materials Today: Proceedings*. 2019;18(7):5087–5099. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.505>.
 6. Maximov J., Duncheva G., Anchev A., Dunchev V., Anastasov K., Daskalova P. Effect of Roller Burnishing and Slide Roller Burnishing on Surface Integrity of AISI 316 Steel: Theoretical and Experimental Comparative Analysis. *Machines*. 2024;12:51. <https://doi.org/10.3390/machines12010051>
 7. Noronha D.J., Sharma S., Prabhu Parkala R., Shankar G., Kumar N., Doddapaneni S. Deep Rolling Techniques: A Comprehensive Review of Process Parameters and Impacts on the Material Properties of Commercial Steels. *Metals*. 2024;14:667. <https://doi.org/10.3390/met14060667>
 8. Zenin I.O., Akulinichev P.D., Albov M.A. et al. Study of finishing and hardening treatment by the method of rolling with software control using a toroidal roller. *Tekhnologiya metallov* [Technology of metals]. 2024;(4):29-37. (In Russ.)
 9. Mehrzad Boozarpour, Reza Teimouri. Parametric study of multi-roller rotary burnishing process. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. 2021;4(2):179-194. <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2020.10.001>
 10. Varga G., Viktoria Ferencsik. Investigation of the Effect of Surface Burnishing on Stress Condition and Hardening Phenomena. *Tehnički vjesnik*. 2022;29(4):1247-1253. <https://doi.org/10.17559/TV-20211110171854>
 11. Zaydes S.A., Nguyen Huu Hai. *Protsessy poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniia: monografiya* [Processes of surface plastic deformation: monograph]. Irkutsk: Publishing house of Irkutsk National Research Technical University, 2025, 405 p. (In Russ.)
 12. Zaydes S.A., Ho M.K. Study of the stress-strain state of parts strengthened by plastic deformation under cyclic loading. *Vestnik mashinostroeniia* [Bulletin of mechanical engineering]. 2022;(8):28-35. (In Russ.)
 13. Zaydes S.A., Vu K.H. *Sposob poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniia naruzhnykh poverkhnostei tel vrashcheniia* [Method of surface plastic deformation of external surfaces of bodies of revolution]. Patent RU, no. 2824641, 2024.
 14. Yadav P.S., Ghatge D.A. (2018). Analysis of Optimized Roller Burnishing Parameters Using ANSYS. *Advanced Manufacturing and Materials Science*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76276-0_6
 15. Finite Element Analysis of Bearing Structure Based on ANSYS Workbench. Modeling and Simulation. 2023;12(06):5737-5750. DOI 10.12677/mos.2023.126521.
 16. Li J, Xu Y, Liu Y. Influence of Initial Yield Strength Weighting on Residual Stresses in Quenched Cylinders Using Finite Element Analysis. *Materials*. 2024;17(23):5833. <https://doi.org/10.3390/ma17235833>
 17. Dudda W., Ziółkowski P.J., Ziółkowski P., Bryk M., Badur J. A Concept of Thermal Effort for Heat-Induced Metal Plasticity. *Materials*. 2024;17(19):4824. <https://doi.org/10.3390/ma17194824>
 18. Zaydes S.A., Ho M.K. Pendulum surface plastic deformation of cylindrical blanks. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaia metallurgiiia* [News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy]. 2022;65(5):344-353. (In Russ.)
 19. Rotella G, Caruso S, Del Prete A, Filice L. Prediction of Surface Integrity Parameters in Roller Burnishing of Ti6Al4V. *Metals*. 2020;10(12):1671. <https://doi.org/10.3390/met10121671>
 20. Oteniy Ya.N., Privalov N.I., Shchegolev N.G. et al. Features of the formation of the depth of hardening during the processing of parts by surface plastic deformation. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovanii* [International Journal of Applied and Fundamental Research]. 2016;(12-3):452-455. (In Russ.)
 21. Oteniy Ya.N. Influence of deforming roller parameters on contact geometry and hardening depth during SPD machining of shafts and holes. *Uprochniiaushchie tekhnologii i pokrytiia* [Hardening technologies and coatings]. 2006;(4(16)):8-10. (In Russ.)

Поступила 09.10.2025; принята к публикации 21.02.2026; опубликована 31.03.2026
Submitted 09/10/2025; revised 21/02/2026; published 31/03/2026

Зайдес Семен Азикович – доктор технических наук, профессор,
Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия.
Email: zsa@istu.edu. ORCID 0000-0001-9416-7749

Ву Куанг Хай – аспирант,
Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия.
Email: vuquangkhai98hp@gmail.com. ORCID 0009-0000-2938-8369

Semen A. Zaides – DrSc (Eng.), Professor,
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.
Email: zsa@istu.edu. ORCID 0000-0001-9416-7749

Vu Quang Khai – Postgraduate Student,
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.
Email: vuquangkhai98hp@gmail.com. ORCID 0009-0000-2938-8369

ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

MATERIAL PROCESS ENGINEERING

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.9; 621.927.7; 621.951.4; 553.179; 519.876.5
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-1-60-68



РАЗВИТИЕ МЕТОДОЛОГИИ АДАПТИВНОГО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ СУБТРАКТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЛЕЗВИЙНЫМИ ИНСТРУМЕНТАМИ

Сергеев Ю.С.¹, Гоголев В.П.¹, Платов С.И.², Сергеев С.В.¹, Толмачев Е.В.¹

¹ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

² Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Современная степень цифровизации проведения геологоразведочных работ, обустройства и эксплуатации скважин на разведанных месторождениях, а также изготовления деталей высокотехнологичной техники в металлообработке требует создавать технологическую подготовку производства высокого уровня с использованием цифровых двойников процессов и искусственного интеллекта. Для практической реализации такой концепции требуется глубокое понимание динамики физических весьма близких по сути процессов бурения и сверления скважин и отверстий. Полученные знания позволили получить адекватные реальным математические (имитационные) модели, которые будут полезны при проектировании и реализации таких технологических процессов. Это позволит исключить погрешности обработки, ошибки проектирования и снизить затраты на подготовку производства. Математическое моделирование повышает культуру производства и позволяет прогнозировать точность обработки на стадии проектирования операций. **Цель работы.** Разработка и практическая реализация концепции цифрового двойника процесса формообразования точных отверстий (скважин) вращающимися концевыми многолезвийными инструментами. **Используемые методы.** Представленные в статье модели получены на основе имитационного моделирования с использованием аналитических методов, базирующихся на фундаментальных физических законах и основных положениях механики резания и вибрационной механики, а также теории пластической деформации материала в зоне стружкоотделения. Научная новизна приведенных в данной статье исследований заключается в разработке цифрового двойника формообразования обрабатываемой поверхности, который впервые учитывает взаимосвязь стружкоотделения и влияние его на точность обработки с учетом режимов резания и виброперемещений инструмента. **Результат.** В статье представлена часть разработанного впервые методологического и математического обеспечения для цифрового двойника формообразования отверстий (скважин) вращающимися концевыми многолезвийными инструментами. Применение цифрового двойника на производстве имеет большую практическую значимость, так как позволяет осуществлять точностную верификацию управляющих программ для станков с ЧПУ и бурового оборудования.

Ключевые слова: формообразование отверстий и скважин, вращающиеся концевые многолезвийные инструменты, стружкоотделение, имитационное моделирование, точностная верификация управляющих программ, цифровой двойник

© Сергеев Ю.С., Гоголев В.П., Платов С.И., Сергеев С.В., Толмачев Е.В., 2026

Для цитирования

Развитие методологии адаптивного интеллектуального проектирования с использованием цифровых двойников субтрактивных процессов формообразования внутренних поверхностей лезвийными инструментами / Сергеев Ю.С., Гоголев В.П., Платов С.И., Сергеев С.В., Толмачев Е.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №1. С. 60-68. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-60-68>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

DEVELOPMENT OF AN ADAPTIVE INTELLIGENT DESIGN METHODOLOGY USING DIGITAL TWINS OF SUBTRACTIVE PROCESSES FOR INTERNAL SURFACE FORMATION WITH CUTTING TOOLS

Sergeev Yu.S.¹, Gogolev V.P.¹, Platov S.I.², Sergeev S.V.¹, Tolmachev E.V.¹

¹ South-Ural State University, Chelyabinsk, Russia

² Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The current level of digitalization in geological exploration, well development and operation at explored deposits, as well as in the manufacturing of high-tech machinery parts in metalworking, requires the creation of advanced technological production planning based on the use of digital twins and artificial intelligence. The practical implementation of this concept requires a deep understanding of the dynamics of physically similar processes such as drilling wells and machining holes. The knowledge obtained has made it possible to develop mathematical (simulation) models that adequately reflect real processes and can be effectively applied in the design and implementation of such technological processes. This approach makes it possible to eliminate processing inaccuracies, design errors, and decrease pre-production costs. Mathematical modeling improves the production culture and enables prediction of processing accuracy at the process design stage. **Objectives.** The study is aimed at developing and practically implementing the digital twin concept for precision hole (well) formation using rotating end multi-edge tools. **Methods Applied.** The models presented in the article are obtained using simulation modeling based on analytical methods grounded in fundamental physical laws, the basic principles of cutting and vibration mechanics, as well as the theory of plastic deformation of the material in the chip separation zone. The scientific novelty of the research lies in the development of a digital twin for surface formation, which for the first time considers the interrelation of chip separation and its effect on processing accuracy, taking into account cutting modes and tool vibration displacements. **Result.** The article presents a part of the methodological and mathematical software developed for the first time for the digital twin of hole (well) formation using rotating end multi-edge tools. The application of the digital twin in industrial practice has significant practical importance, as it enables accuracy verification of control programs for CNC machines and drilling equipment.

Keywords: holes and wells formation, rotating end multi-edge tools, chip separation, simulation modeling, accuracy verification of control programs, digital twin

For citation

Sergeev Yu.S., Gogolev V.P., Platov S.I., Sergeev S.V., Tolmachev E.V. Development of an Adaptive Intelligent Design Methodology Using Digital Twins of Subtractive Processes for Internal Surface Formation with Cutting Tools. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 1, pp. 60-68. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-60-68>

Введение

Для выполнения требуемых точностных показателей поверхностей, например отверстий в машиностроительных изделиях [1-4] и скважин в геологоразведке и нефтегазодобыче [4-9], требуется технологическая подготовка производства высокого уровня, которая позволяет исключить погрешности обработки, ошибки проектирования переходов и операций, а также ошибки в управляющих программах (УП), потенциально приводящие, например, к аварийным столкновениям инструмента с исполнительными органами станка [10, 11]. Для предотвращения таких негативных последствий на всех стадиях технологического проектирования производства изделия требуется предварительная проверка, которая заключается в минимизации физических (не цифровых) испытаний [10, 11], например, таких как отладка УП формообразования отверстий в первой детали (скважине) и их последующее полное исключение с заменой на

цифровые (виртуальные) испытания. При этом цифровое (виртуальное) моделирование процесса сверления (бурения) определяет как количественные, так и качественные показатели изделия, например полученной внутренней поверхности (ВП) [11-14]. Поэтому развитие цифровых технологий существенно повышает роль цифровых двойников компьютерного моделирования на всех этапах проектирования технологий изготовления изделий промышленности, позволяя повысить эффективность, минимизировать состав и количество натуральных испытаний, заменив их цифровыми, что позволит сократить затраты на создание и эксплуатацию изделия, в частности внутренней поверхности [3, 10, 11-14].

Цифровая модель по сути является имитационной, то есть воспроизводящей описание последовательных физических состояний технологической системы в динамике, обладающей высокими анимационными возможностями, позволяющими визуализи-

ровать поведение и функционирование реальной системы и моделируемых сценариев. Такая модель должна иметь информационную природу, обеспечивающую развитый обмен входной и выходной информации и знаниями между физической системой и ее модельным аналогом. Для этого цифровая модель должна быть открытой и саморазвивающейся системой, легко адаптируемой на основе дополнительных физических данных и поддерживать развитую аналитику реального времени [11].

Современное проектирование и строительство геологоразведочных и газонефтедобывающих скважин, подобно как и современное машиностроительное производство, сегодня находятся в весьма жестких конкурентных экономических условиях. Например, предприятия, выпускающие высокотехнологичную технику авиационного и ракетно-космического назначения, вынуждены непрерывно совершенствовать свою продукцию, при освоении которой постоянно повышаются требования к точности изготовления ее деталей. Достижение требуемых точностных параметров деталей обеспечивается при формообразовании их поверхностей. Формообразование любой поверхности детали – это достаточно трудная задача, тем более, что сам по себе процесс формообразования ВП вращающимися концевыми многолезвийными инструментами (ВКМИ) типа сверл, зенкеров, разверток, фрез, буров и т.п. сложный. Сложность процесса объясняется воздействием, во-первых, статических факторов (геометрия режущей части инструмента, погрешности ее заточки, износ, режимы обработки и т.п.) на силы резания, а через площади срезаемых слоев и на погрешности формообразования поверхностей, причем оно хорошо изучено и на практике легко устраняется [15]. Во-вторых, на образование погрешностей обработанных поверхностей существенно влияют еще и динамические факторы, которые не всегда принимают во внимание.

В частности, нами установлено, что процесс работы любого ВКМИ не имеет собственной радиальной устойчивости, то есть его режущая часть, образуя неголономную связь с поверхностью резания, совершает радиальные колебания [10]. Колебания ВКМИ, возникающие в процессе формообразования поверхности отверстия в детали (скважины), полностью исключить невозможно, но можно управлять их параметрами, а значит, и оперативно влиять на перераспределение сечений срезаемых слоев и, соответственно, на размеры и форму образуемой поверхности. То есть нужно срезать слои, путем изменения параметров колебаний инструмента, перераспределить на каждом зубе таким образом, чтобы вся совокупность срезаемых слоев могла обеспечить требуемые размер и форму образуемой поверхности. При этом необходимо срезать слои связать системой координат с соответствующими режущими лезвиями, имеющими жесткую координатную связь с осью инструмента и совершающими вместе с инструментом сложное движение (вращательное движение вокруг оси инструмента и квазикруговое колебательное от-

носительно собственной оси вращения). Тогда такие срезаемые слои можно назвать координированными, а всю их совокупность – массивом удаляемого материала, размеры и форма поверхности которого будут отображением формируемой поверхности детали. То есть если, просчитав параметры срезаемых слоев каждым зубом ВКМИ сложить их геометрически и вычесть этот суммарный объем из массива заготовки, то, не прибегая к расчету сил резания, можно легко получить размеры и форму формообразуемой поверхности.

Полученные результаты и их обсуждение

Итак, ранее нами были описаны механизмы [16] перераспределения сечений срезаемых слоев из-за радиальных (поперечных) и осевых автоколебаний вращающегося концевого многолезвийного инструмента. Осевые и крутильно-осевые автоколебания ВКМИ сами по себе не нарушают симметрии его режущей части, но в сочетании с поперечными автоколебаниями приводят к нарушениям точности обработки, так как в процессе формообразования отверстия происходит перераспределение срезаемых слоев, при этом за каждое полное колебание центра инструмента зуб с фактической нулевой скоростью в данный момент времени смещается на дискретный угол.

Физически процесс формообразования происходит таким образом, что одно из лезвий не режет, а сминает материал, например металл своей задней поверхностью, то есть фактическая скорость на этом лезвии равна нулю. Рост силы смятия будет продолжаться до тех пор, пока она не уравнивает суммарную положительно направленную тангенциальную силу резания на остальных зубьях. При этом образуется неголономная связь инструмента с поверхностью резания, а инструмент совершает как бы «планетарное качение» своими зубьями по поверхности резания, оставляя «риски».

Рассмотрим движение ВКМИ с точки зрения сферического движения твердого тела [17]. Скорости точек твердого тела в каждый момент времени определяются как их вращательные скорости при одновременном вращении вокруг мгновенной оси Ω (рис. 1, а). Зная положение мгновенной оси вращения Ω и угловую скорость тела ω , можно определить скорость V любой точки M тела как скорость этой точки во вращательном движении вокруг мгновенной оси Ω . Если мгновенное положение оси Ω уже установлено, то для нахождения угловой скорости ω достаточно знать скорость перемещения оси какой-либо точки A , не лежащей на мгновенной оси Ω (рис. 1, б).

Вектор $\vec{\omega}$ откладывается от неподвижной точки O по мгновенной оси Ω . Его направление определяется направлением скорости \vec{V}_A . Сложное сферическое движение твердого тела получается при сложении двух вращательных движений вокруг пересекающихся осей: переносное с угловой скоростью ω_e и относительное с угловой скоростью ω_r .

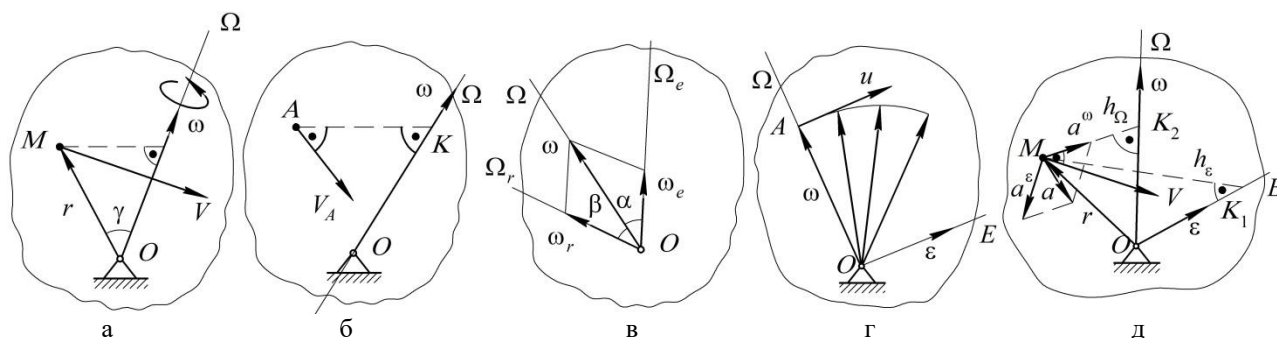


Рис. 1. Схемы скоростей твердого тела при сферическом движении: а – векторная диаграмма скорости V точки M ; б – схема для нахождения угловой скорости ω ; в – схема абсолютного вращения тела со скоростью $\bar{\omega}$; г – годограф вектора угловой скорости \bar{u} точки A ; д – схема для нахождения ускорений точки M

Fig. 1. Diagrams of the velocities of a solid body in spherical motion: а is vector diagram of the velocity V of point M ; б is diagram for identifying the angular velocity ω ; в is diagram of the absolute rotation of a body with a velocity $\bar{\omega}$; г is a hodograph of the angular velocity vector \bar{u} of point A ; д is a scheme for identifying accelerations of point M

Скорость абсолютного вращения тела $\bar{\omega}$ вокруг мгновенной оси определим как геометрическую сумму угловых скоростей составляющих вращений (рис. 1, в). Если величина и направление угловой скорости $\bar{\omega}$ известны для любого момента времени, то угловое ускорение $\bar{\epsilon}$ найдем, построив годограф вектора угловой скорости \bar{u} , определим скорость \bar{u} движения точки A – конца вектора угловой скорости $\bar{\omega}$ – по годографу в момент времени t (рис. 1, г). Радиусом-вектором точки A является вектор $\bar{\omega}$, а скорость точки равна производной от радиуса-вектора по времени t . Поскольку при сферическом движении твердого тела [17] векторы углового ускорения $\bar{\epsilon}$ и угловой скорости \bar{u} хоть и равны по величине, но направлены они по разным прямым (см. рис. 1, г), то в соответствии с теоремой Ривальса ускорение любой точки тела равно геометрической сумме вращательного и центростремительного ускорений (рис. 1, д).

Модуль ускорения точки M находится как диагональ параллелограмма ускорений. Вследствие того, что векторы угловой скорости $\bar{\omega}$ и углового ускорения $\bar{\epsilon}$ направлены по разным осям, вращательная составляющая ускорения a^ω может быть направлена по отношению к вектору скорости \bar{V} под любым углом, оставаясь перпендикулярной вектору \bar{r} . В этом существенное различие между вращением твердого тела вокруг неподвижной оси и движения тела, имеющего одну неподвижную точку. Применим законы сферического движения тела к ВКМИ и обозначим: Z – ось неподвижного конуса и переносного движения; Z_1 – ось относительно перемещения подвижного конуса; O – центр тяжести сверла; O_1 – точка пересечения Z_1 и проекций режущих кромок на плоскости ZOX ; Y_0 – угол увода оси сверла; Y – угол между образующей и осью Z_1 подвижного конуса; l – длина вылета сверла (отрезок BO_1); z – расстояние от оси сверла до центра тяжести сверла (отрезок OO_1);

$D_{ин}$ – диаметр сверла; φ – половина угла в плане сверла; $\omega_{вр}$ – угловая скорость вращения сверла вокруг своей оси Z_1 ; ω – угловая скорость вращения сверла; h_A – расстояние от точки A до мгновенной оси вращения Ω ; точка B – неподвижная точка, вокруг которой происходит движение сверла; точка K_1 – неподвижная точка режущей кромки сверла, лежащая на мгновенной оси Ω и точка пересечения режущей кромки сверла и образующей подвижного конуса; A – точка режущей кромки сверла, не лежащая на мгновенной оси Ω ; ω_k – частота колебаний ВКМИ; ρ – радиус колебаний ВКМИ; F – сила инерции сверла от высокочастотных колебаний; $P_{ос}$, $P_{рад}$ – осевая и радиальная составляющие сил резания; $P_{уп}$ – сила упругости сверла (рис. 2, а). Мгновенная ось конуса Ω совпадает с образующей конуса BK_1 , поскольку скорости точек этой образующей равны нулю.

Скорость вращения точки A равна

$$\frac{\omega_r \cdot D_{ин}}{2} = \frac{\omega \cdot D_{ин}}{2}. \quad (1)$$

Выразив модули абсолютной, относительной и переносной скоростей вращения через (1), получим скорость точки O_1 :

$$\begin{aligned} V_{O_1} &= \omega_e \cdot \rho = \omega \cdot K_1 O_1 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - Y - \varphi\right) = \\ &= \frac{\omega \cdot D_{ин} (Y + \varphi)}{2 \cdot \sin \varphi} = \frac{\omega_{вр} D_{ин} \cdot \sin(Y + \varphi)}{4 \cdot \sin \varphi \cdot \cos Y}, \end{aligned} \quad (2)$$

и радиус-вектор ρ ее перемещения

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{\omega \cdot D_{ин} \cdot \sin(Y + \varphi)}{\omega_e \cdot 2 \cdot \sin \varphi} = \frac{\omega \cdot D_{ин} \cdot \sin(Y + \varphi) \cdot \sin Y_0}{\omega \cdot 2 \cdot \sin Y \cdot \sin \varphi} = \\ &= \frac{D_{ин} \cdot \sin(Y + \varphi) \cdot \sin Y_0}{2 \cdot \sin Y \cdot \sin \varphi}. \end{aligned} \quad (3)$$

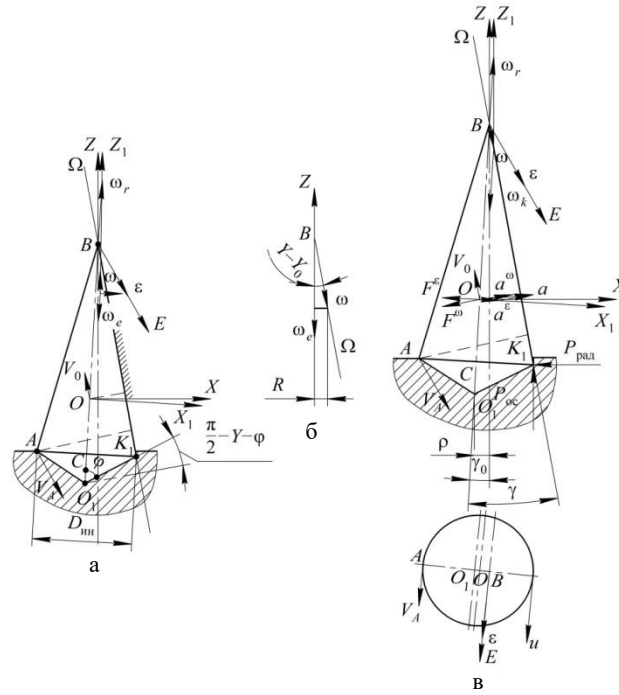


Рис. 2. Сферическое движение ВКМИ: а – схема для нахождения скоростей и ускорений ВКМИ; б – годограф вектора угловой скорости $\vec{\omega}$; в – схема сил, действующих на ВКМИ
 Fig. 2. Spherical motion of the REMT: a is a scheme for identifying the velocities and accelerations of the REMT; б is a hodograph of the angular velocity vector $\vec{\omega}$; в is diagram of the forces acting on the REMT

Для определения углового ускорения $\vec{\epsilon}$ необходимо построить годограф угловой скорости $\vec{\omega}$ (рис. 2, б). При качении конуса по основанию BK_1 вектор $\vec{\omega}$ поворачивается вокруг оси Z . Так как модуль его не изменяется, то конец вектора $\vec{\omega}$ описывает окружность радиусом $R = \omega \cdot \sin(Y - Y_0)$ вокруг оси Z в горизонтальной плоскости (рис. 2, в). Вектор $\vec{\epsilon}$ геометрически равен скорости \vec{u} конца вектора $\vec{\omega}$. В данном случае скорость \vec{u} является вращательной вокруг оси Z . Находим ее как вращательную скорость точки – конца вектора угловой скорости $\vec{\omega}$ – при вращении вектора вокруг оси Z .

Определим модуль скорости и вектор углового ускорения $\vec{\epsilon}$:

$$\begin{aligned} \epsilon = u = \omega_e \cdot R = \omega_e \cdot \omega \cdot \sin(Y - Y_0) = \\ = \omega^2 \cdot \frac{\sin Y \cdot \sin(Y - Y_0)}{\sin Y_0}. \end{aligned} \quad (4)$$

Найдем ускорение a_0 точки O (центра тяжести сверла):

$$a_0 = \omega^4 \cdot Q^2 \cdot \left[\frac{1 + \left[\frac{\sin(Y - Y_0)}{\sin Y_0} \right]^2}{\sin Y_0} - 2 \cdot \frac{\cos(Y + Y_0) \cdot \sin(Y - Y_0)}{\sin Y_0} \right] \quad (5)$$

Зная одну из трех угловых скоростей $\omega_r = \omega_{вр}$ и положение всех трех осей вращения, построим параллелограмм угловых скоростей и определим две другие угловые скорости. Как мы видим, переносная скорость ω_e , как и мгновенная скорость, направлены в обратную сторону вращению ВКМИ, при этом $\omega_k = \omega_e$. Аналогичным способом можно найти ускорение точки O_1 . Теперь рассмотрим силы, действующие на ВКМИ (рис. 2, в). На сверло действуют осевая $P_{ос}$ и радиальная $P_{рад}$ составляющие сил резания, сила упругости сверла $P_{уп}$ и F – сила инерции виброперемещений сверла, равная векторной сумме составляющих ее проекций F^{ω} , F^{ϵ} на соответствующие оси. Рассмотрим силы, действующие на сверло по оси Z_1 , направленной вдоль оси сверла:

$$(P_{уп} - P_{рад}) \sin Y_0 + P_{ос} \cos Y_0 = F^{\omega} \cdot \cos Y. \quad (6)$$

Исходя из того, что

$$\omega_k = \omega_e = \omega_{вр} \cdot \frac{\operatorname{tg} Y}{2 \cdot \sin Y_0}, \quad (7)$$

и выполнив соответствующие тригонометрические преобразования, из (3) и (7) найдем угол Y_0 :

$$Y_o = \arccos \left[\frac{P_{oc}}{\sqrt{(P_{yn} - P_{рад})^2 + P_{oc}^2}} \right] \pm \quad (8)$$

$$\pm \arccos \left[\frac{F^\omega \cdot \cos Y}{\sqrt{(P_{yn} - P_{рад})^2 + P_{oc}^2}} \right],$$

$$\operatorname{tg} Y = \frac{D_{ин}}{2 \cdot l - D_{ин} \cdot \operatorname{ctg} \varphi}. \quad (9)$$

В соответствии с теоремой Ишлинского [17], найдем телесный угол Ω_1 подвижного конуса инструмента:

$$\Omega_1 = 2\pi(1 - \cos Y) = 2\pi \left(1 - \frac{2 \cdot l - D_{ин} \cdot \operatorname{ctg} \varphi}{\sqrt{(2 \cdot l - D_{ин} \cdot \operatorname{ctg} \varphi)^2 + D_{ин}^2}} \right). \quad (10)$$

Ω_1 – угол, на который повернется образующая, описывающая наружную коническую поверхность сверла за один его оборот относительно своего предыдущего положения. То есть образующая сверла за каждый его оборот будет поворачиваться на угол $2\pi + \Omega_1$. Поскольку ось Z_1 вращается вокруг оси Z с угловой скоростью $\omega_k = \omega_\varepsilon$, не равной нулю, то угол, на который повернется Z_1 ВКМИ (сверла) обозначим φ_2 , а приравняв $\varphi_2 = 2\pi$ вычислим период вращения центра масс сверла T_2 :

$$T_2 = \frac{\sqrt{1 + \frac{\sin Y \cdot \sin(Y - Y_o) \cdot \cos Y}{\sin Y_o}} - 1}{b \cdot \frac{\sin Y \cdot \sin(Y - Y_o)}{\sin Y_o}} = \quad (11)$$

$$= \frac{\sqrt{1 + \frac{\sin Y \cdot \sin(Y - Y_o) \cdot \cos Y}{\sin Y_o}} - 1}{\frac{\omega_{вп} \cdot \operatorname{tg} Y}{\sin Y_o} \cdot \frac{\sin Y \cdot \sin(Y - Y_o)}{\sin Y_o}},$$

а величина угла φ_2 , на который повернется ось сверла после одного оборота, будет равна

$$\varphi_2 = \Omega_2 + \omega_\varepsilon T_2 + \varepsilon \cdot \frac{T_2^2}{2} =$$

$$= 2\pi(1 - \cos Y_o) + \frac{\sqrt{1 + \frac{\sin Y \cdot \sin(Y - Y_o) \cdot \cos Y}{\sin Y_o}} - 1}{2 \cdot \frac{\sin Y \cdot \sin(Y - Y_o)}{\sin Y_o}} + \quad (12)$$

$$+ \frac{\omega_{вп}}{4 \cdot \cos Y_o} \cdot \left[\frac{\sqrt{1 + \frac{\sin Y \cdot \sin(Y - Y_o) \cdot \cos Y}{\sin Y_o}} - 1}{\frac{\omega_{вп} \cdot \operatorname{tg} Y}{\sin Y_o} \cdot \frac{\sin Y \cdot \sin(Y - Y_o)}{\sin Y_o}} \right]^2,$$

где Ω_2 – телесный угол конуса, образованного перемещением (вращением) оси Z_1 относительно оси Z , который определяется аналогично Ω_1 .

Полученная математическая модель доказывает существование дискретного угла, на который за каждое полное поперечное колебание центра инструмента смещается лезвие ВКМИ с фактической нулевой скоростью в текущий момент времени. Эта модель позволяет определять положение инструмента в любой момент времени, скорость и ускорение любой точки инструмента в текущий момент времени, угол отклонения оси сверла от поворотной оси симметрии, дискретный угол поворота (смещения) каждого зуба (лезвия) ВКМИ. Кроме того, она используется в программах как исходная для расчета площадей срезаемых слоев на зубьях ВКМИ при их перераспределении из-за поперечных колебаний инструмента.

Программы [12] предназначены для высокоточного моделирования, верификации и визуализации в режиме реального времени динамических процессов формообразования отверстий на языке *ISO 7-bit*. Любая из этих программ встраивается в какой-либо программный пакет, например *VeriCut*, *Sprut NCTuner*, *Siemens NX* и т.п. Перед обработкой управляющей программы на реальном программном станке производят ее оптимизацию по точности размера и продольной формы отверстий посредством того же точностного субтрактивного симулятора. Оптимизацию производят, изменяя соотношения частот радиальных и осевых колебаний посредством управления режимами резания. Тем самым перераспределяют объемы срезаемых слоев на зубьях инструмента и, соответственно, оперативно влияют на геометрические параметры формируемой поверхности детали, то есть на точность размера и продольной формы отверстия (рис. 3, а). После ввода исходных данных симулятор производит расчет геометрии отверстия с визуализацией и в таблицу выдает отчет. Для корректировки режимов резания частоту ω изменяют до тех пор, пока величина диаметальной разбивки не будет удовлетворять требованиям чертежа (это можно пошагово сделать вручную и автоматически). Помимо этого, симулятор позволяет показывать «мгновенную» разбивку в любом поперечном сечении отверстия и даже рассчитывать «мгновенный» объем срезанного материала каждым зубом в любой момент времени, что позволяет визуально наблюдать за обработкой в режиме реального времени. Работа симулятора позволяет визуализировать влияние совместного действия осевых и радиальных колебаний инструмента на точность продольной формы отверстий. В окно ввода исходных данных этого симулятора добавлены окна для задания амплитуды осевых колебаний инструмента.

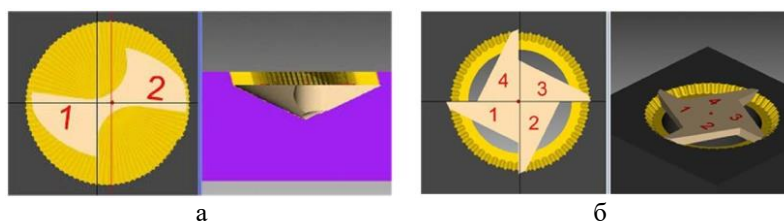


Рис. 3. Скриншоты работы симулятора: а – визуализация влияния амплитуды осевых колебаний на величину увода отверстия; б – полученные данные замера величины увода оси отверстия
 Fig. 3. Screenshots of the simulator: a is visualization of the effect of the axial vibrations amplitude on the amount of hole deflection; б is the obtained data for measuring the amount of hole axis deflection

При наличии осевых колебаний инструмента ось отверстия во время обработки начинает отклоняться в сторону. Причем чем больше амплитуда колебаний ВКМИ, тем больше будет величина увода оси отверстия (см. рис. 3, а). Численные значения геометрии профиля продольного сечения отверстия можно зафиксировать, используя в программе инструменты замера (рис. 3, б). Корректируя режимы резания, амплитуду осевых колебаний инструмента изменяют до тех пор, пока величина искажения продольного сечения отверстия не попадет в регламентированный допуск (это можно пошагово сделать вручную и автоматически). В симуляторе также есть функция расчета объема срезанного материала за любой промежуток времени с учетом осевых колебаний инструмента.

Заключение

1. Разработана цифровая модель перемещений ВКМИ при формообразовании круглых отверстий (скважин), позволившая установить физическую сущность процесса формообразования и основные закономерности функционирования вращающихся концевых многолезвийных инструментов, заключающиеся в том, что режущая часть таких инструментов независимо от конструкции, не имея собственной радиальной устойчивости и образуя неголономную связь с поверхностью резания совершают колебания. Из-за колебаний многозубого инструмента на процесс накладывается взаимодействие зубьев через перераспределение сечений срезаемых слоев на зубьях. Эти изменения вызывают колебания сил резания на каждом зубе и неоднозначность коллективного поведения всех зубьев. В свою очередь, изменения размеров срезаемых слоев по зубьям, а значит, и элементов стружки с частотой колебаний приводит к изменению формы дрейфовой траектории движения режущей части ВКМИ. А форма траектории определяет размеры и форму образуемой поверхности.

2. Разработаны теоретические основы метода оперативного управления размерами и формой обрабатываемых поверхностей деталей и стружки. Метод основан на перераспределении площадей срезаемых слоев на зубьях ВКМИ путем управления параметрами колебаний.

3. Разработана методология проектирования процессов обработки поверхностей различными ВКМИ,

отличающаяся тем, что она основана на управлении размерами срезаемых слоев в зоне резания посредством механизма колебаний режущей части инструмента. А это, в свою очередь, позволяет адекватно реальным процессам в системе 2D- и 3D-моделирования с учетом динамических факторов делать проектный расчет выходных параметров переходов (операций) непосредственно при составлении программы для программных станков и ее верификации, например, в программе *Vericut*.

Разработанная методология проектирования процессов обработки внутренних поверхностей различными ВКМИ, реализованная в виде субтрактивных симуляторов, применима в металлообработке, горном деле и полезна для специалистов технологической подготовки производства при разработке и верификации УП к станкам с ЧПУ, а также у разработчиков АСТПП (автоматизированной системы технологической подготовки производства) и эффективно используется на производстве некоторых оборонных предприятий Челябинской области.

Список источников

1. Лычкина Н.Н., Павлов В.В. Концепция цифрового двойника и роль имитационных моделей в архитектуре цифрового двойника // Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2023): сборник трудов Казань, 2023. С. 139-149.
2. Киселев Е.С., Илюшкин М.В. Компьютерное моделирование процесса сверления сложных пакетов титанового сплава и композиционного материала с использованием цифровых двойников // Научно-технические достижения в машиностроении. 2023. Т. 2023. № 8. С. 3-11. DOI: 10.30987/2223-4608-2023-3-11
3. Акинцева А.В., Переверзев П.П., Дегтярева-Кашутина А.С. Цифровой двойник формообразования обрабатываемой поверхности нежесткого вала с эллипсным профилем при круглом врезном шлифовании // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №4. С. 98–106. DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-4-98-106
4. Запорожцев А.В., Хазова Вер.И., Хазова Вик.И. Ключевые аспекты создания цифрового двойника процесса системы менеджмента качества // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №4. С. 105-116. DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-4-105-116

5. Кармыссова А. К. Использование цифровых двойников в геологоразведке и добыче нефти: потенциал, практика и вызовы внедрения // Символ науки. 2025. №8-1. С. 6-10
6. Accelerating well construction using a digital twin demonstrated on unconventional well data in North America / Saini G., Ashok P., van Oort E., Isbell M.R. // SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference, 23-25 July 2018: Proceedings. Houston, Texas, USA, 2018. Paper URTEC-2902186-MS. 13 p. DOI: 10.15530/URTEC-2018-2902186.
7. Derek N., Maryam Gholami M., Rolv R. Drilling with Digital Twins. Conference: IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition, August 2018. ResearchGate Paper. DOI:10.2118/191388-MS.
8. Nguyen Thi Anh, Tran Thanh Tung. Drilling Modelling Using Computer Simulation // International Journal Of Scientific & Technology Research. 2020, vol. 9, iss. 10, pp. 171-174.
9. Сучок С.Н., Корнев Р.В., Кушманов П.В. Цифровой двойник бурения как операционная среда повышения эффективности процесса строительства скважин // Сетевое издание «Бурение и нефть» [Электронный ресурс]. 2021. URL: <http://www.burneft.ru> (дата обращения: 08.11.2025).
10. Сергеев С.В. Повышение эффективности вибрационных процессов при обработке различных материалов: монография. Челябинск, 2004. 262 с.
11. Сергеев С.В., Шелегов А.А., Сергеев Ю.С. Особенности верификации управляющих программ по точности формообразования поверхностей // Наука ЮУрГУ: материалы 67-й научной конференции. Секции технических наук. Челябинск, 2015. С. 1772- 1776.
12. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ №2015662879 РФ. Симулятор для точностной верификации управляющих программ обработки отверстий перераспределением координированных срезаемых слоев на зубьях многолезвийных инструментов / С.В. Сергеев, Ю.С. Сергеев, В.П. Гоголев, А.А. Шелегов. Заявка № 2015619790. Приоритет изобретения 15.10.2015. Зарегистрирован 04.12.2015. Патентообладатель ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ).
13. Сергеев С.В., Сергеев Ю.С., Решетников Б.А. Динамический способ управления трассой скважины при направленном бурении // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн. 2013. №5. С. 89-103. URL: http://ogbus.ru/authors/SergeevSV/SergeevSV_3.pdf
14. Сергеев С.В., Сергеев Ю.С. Влияние синхронизации автоколебаний бурового инструмента на формирование трассы скважины // Нефтегазовое дело. 2014. №12-4. С. 12-17.
15. Козлов А.В. Повышение эффективности процессов многопереходной обработки отверстий концевыми мерными инструментами и их технологической подготовки на основе математического моделирования: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. Челябинск, 1993. 20 с.
16. А.с. СССР №1710213. Способ обработки отверстий мерным многолезвийным инструментом / Лакирев С.Г., Хилькевич Я.М., Сергеев С.В. 07.02.1992. Патентообладатель ЧПИ им. Ленинского комсомола.
17. Фомичев А.В. Кинематика точки и твердого тела: учеб. пособие. М.: МФТИ, 2021. 128 с.

References

1. Lychkina N.N., Pavlov V.V. The concept of a digital twin and the role of simulation models in the architecture of a digital twin. *Imitacionnoe modelirovanie. Teoriya i praktika (IMMOD-2023). Sbornik trudov odinnadtsatoy vserossiiskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii po imitacionnomu modelirovaniyu i ego primeneniyu v nauke i promyshlennosti* [Simulation modeling. Theory and Practice (IMMOD-2023). Proceedings of the eleventh All-Russian Scientific and Practical Conference on simulation modeling and its application in science and industry]. 2023;139-149. (In Russ.)
2. Kiselev E.S., Ilyushkin M.V. Computer modeling of the drilling process of complex packages of titanium alloy and composite material using digital twins. *Naukoyomkie tekhnologii v mashinostroyenii* [High-tech technologies in mechanical engineering]. 2023;2023(8):3-11. (In Russ.) DOI: 10.30987/2223-4608-2023-3-11
3. Akintseva A.V., Pereverzev P.P., Degtyareva-Kashutina A.S. Digital twin shaping of the treated surface of a non-rigid shaft with an elliptical profile during circular mortise grinding. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021;19(4):98-106. (In Russ.) DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-4-98-106
4. Zaporozhtsev A.V., Khazova V.I., Khazova V.I. Key aspects of creating a digital twin of the quality management system process. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023;21(4):105-116. (In Russ.) DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-4-105-116
5. Karmyssova A. K. The use of digital twins in geological exploration and oil production: potential, practice and challenges of implementation. *Simvol nauki* [A symbol of science]. 2025;(8-1). (In Russ.)
6. Saini G., Ashok P., van Oort E., Isbell M.R. Accelerating well construction using a digital twin demonstrated on unconventional well data in North America. SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference, 23-25 July 2018: Proceedings. Houston, Texas, USA, 2018, 13 p. DOI: 10.15530/URTEC-2018-2902186.
7. Derek N., Maryam Gholami M., Rolv R. Drilling with Digital Twins. IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition, August 2018. ResearchGate Paper. DOI:10.2118/191388-MS.
8. Nguyen Thi Anh, Tran Thanh Tung. Drilling Modelling Using Computer Simulation. *International Journal of Scientific & Technology Research*. 2020;9(10):171-174.
9. Suchok S.N., Korenev R.V., Kushmanov P.V. Digital twin drilling as an operational environment for improving the efficiency of the well construction process. *Setevoe izdanie «Burenie i nefть» - 2021* [Online publication "Drilling and Oil" - 2021]. Available at: <http://www.burneft.ru> (Accessed on August 11, 2025). (In Russ.)
10. Sergeev S.V. *Povyshenie effektivnosti vibratsionnykh protsessov pri obrabotke razlichnykh materialov: Monografiya* [Improving the efficiency of vibration processes in the processing of various materials. Monograph]. Chelyabinsk, 2004, 262 p. (In Russ.)

11. Sergeev S.V., Shelegov A.A., Sergeev Yu.S. Features of verification of control programs for the accuracy of surface shaping. *Nauka YuUrgu: materialy 67-oy nauchnoy konferentsii. Seksii tekhnicheskikh nauk* [SUSU Science: proceedings of the 67th Scientific Conference. Sections of technical sciences]. Chelyabinsk, 2015. Pp. 1772-1776. (In Russ.)
12. Sergeev S.V., Sergeev Yu.S., Gogolev V.P., Shelegov A.A. *Simulyator dlya tochnostnoy verifikatsii upravlyayushchih programm obrabotki otverstiy pereraspredeleniem koordinirovannykh srezаемых sloev na zubyakh mnogolezviynykh instrumentov* [Simulator for precision verification of control programs for processing holes by redistributing coordinated cut layers on the teeth of multi-blade tools]. State registration of the computer program No. 2015662879 of the Russian Federation, 2015.
13. Sergeev S.V., Sergeev Yu.S., Reshetnikov B.A. *A dynamic method for controlling the well route during directional drilling. Neftegazovoe delo: electron. nauch. zhurn.* [Oil and gas business: electronic scientific journal]. 2013;(5):89-103. Available at: http://ogbus.ru/authors/SergeevSV/SergeevSV_3.pdf (In Russ.)
14. Sergeev S.V., Sergeev Yu.S. The influence of synchronization of self-oscillations of drilling tools on the formation of the well route. *Neftgazovoe delo* [Oil and gas business]. 2014;(12-4):12-17. (In Russ.)
15. Kozlov A.V. *Povyshenie effektivnosti protsessov mnogoperekhodnoy obrabotki otverstiy kontsevymi mernymi instrumentami i ikh tekhnologicheskoy podgotovki na osnove matematicheskogo modelirovaniya: avtoref. dis. ... kandidata tekhnicheskikh nauk* [Improving the efficiency of the processes of multi-junction hole processing with end measuring tools and their technological preparation based on mathematical modeling. Extended abstract of Ph.D. dissertation]. 1993, 20 p.
16. Lakirev S.G., Khilkevich Ya.M., Sergeev S.V. *Sposob obrabotki otverstiy mernym mnogolezviynym instrumentom* [A method of processing holes with a dimensional multi-blade tool]. A.S. USSR, no. 1710213, 1992.
17. Fomichev A.V. *Kinematika tochki i tverdogo tela: ucheb. posobie* [Kinematics of a point and a solid body: textbook]. Moscow: MFTI, 2021, 128 p. (In Russ.)

Поступила 26.11.2025; принята к публикации 12.02.2026; опубликована 31.03.2026
Submitted 26/11/2025; revised 12/02/2026; published 31/03/2026

Сергеев Юрий Сергеевич – кандидат технических наук, заведующий кафедрой, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: sergeevys@susu.ru. ORCID 0000-0003-1028-8346

Гоголев Вадим Петросович – соискатель степени кандидата технических наук, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: govadimgo@gmail.com. ORCID 0009-0002-2085-302X

Платов Сергей Иосифович – доктор технических наук, заведующий кафедрой, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: mitodim@magtu.ru. ORCID 0000-0002-4868-4881

Сергеев Сергей Васильевич – кандидат технических наук, профессор, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: sergeevsv@susu.ru. ORCID 0000-0001-7868-4295

Толмачев Евгений Владимирович – ассистент, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: tolmachev@susu.ru. ORCID 0009-0004-4960-6828

Yuriy S. Sergeev – PhD (Eng.), Head of Department, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: sergeevys@susu.ru. ORCID 0000-0003-1028-8346

Vadim P. Gogolev – degree-seeking applicant, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: govadimgo@gmail.com. ORCID 0009-0002-2085-302X

Sergey I. Platov – DrSc (Eng.), Head of Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: mitodim@magtu.ru. ORCID 0000-0002-4868-4881

Sergey V. Sergeev – PhD (Eng.), Professor, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: sergeevys@susu.ru. ORCID 0000-0001-7868-4295

Evgeniy V. Tolmachev – assistant, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: tolmachev@susu.ru. ORCID 0009-0004-4960-6828



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.9.04

DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-1-69-74

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ ЦИЛИНДРОВЫХ ВТУЛОК БУРОВЫХ НАСОСОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ТРЕБУЕМОЕ КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ

Некрасов Р.Ю.

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Параметры качества поверхностного слоя, в частности шероховатость поверхности, являются нормируемыми конструкторской документацией. Это делает обязательным их дальнейшее обеспечение в ходе процесса изготовления деталей и узлов машин. Не исключением являются и цилиндрические узлы насосов буровых. К исполнительным поверхностям их узлов предъявляются повышенные требования по шероховатости поверхности. В качестве метода чистовой обработки для таких деталей используется растачивание. При этом важный вопрос заключается в назначении режимов резания, которые должны обеспечивать получение требуемых параметров качества поверхности. При обработке материалов с особыми свойствами возникает проблема отсутствия рекомендаций по назначению режимов резания. Такую проблему можно решить либо за счет экспериментальных исследований, либо используя теоретические расчеты. В данной работе приводится обоснование возможности использования теоретических зависимостей для назначения режимов резания при обработке материалов с обратным распределением твердости. **Цель работы.** Разработка подхода к определению режимов резания при чистовой обработке материалов с обратным распределением твердости, которые позволяют обеспечить требуемые параметры качества поверхности. **Используемые методы.** В работе использованы методы технологии машиностроения, кластерный анализ, аппроксимация. **Новизна.** На основании расчетов с использованием теоретических формул, которые учитывают особенности формирования шероховатости поверхности, определены технологические режимы резания, которые можно использовать при чистовой токарной обработке деталей, изготовленных из материалов с обратным распределением твердости. **Результат.** В ходе работы были выполнены расчеты величины среднеарифметического отклонения профиля, который представлялся в виде составляющих, порожденных кинематикой и геометрическими параметрами процесса резания, вибрационными процессами в технологической системе, шероховатостью рабочих поверхностей инструмента и упругими деформациями. Расчет был произведен с учетом особенностей обрабатываемого материала (обратным характером распределения твердости). Последующая экспериментальная проверка показала состоятельность полученных результатов. На основе использования кластерного анализа были определены значения режимов, которые обеспечивают требуемый уровень качества. **Практическая значимость.** В результате проведенных исследований были получены рекомендации по режимам механической обработки деталей, которые изготовлены из материалов с обратным распределением твердости. Преимуществом использования полученных результатов на практике является универсальность используемого аппарата. Можно определить теоретически режимы резания при обработке инструментом с различной геометрией и разными державками. Также имеется возможность расчета при изменении конфигурации слоя с обратным распределением твердости. Таким образом, можно совершенствовать процесс технологической подготовки производства.

Ключевые слова: обработка, качество поверхности, шероховатость, режимы, обеспечение

© Некрасов Р.Ю., 2026

Для цитирования

Некрасов Р.Ю. Определение режимов обработки цилиндрических втулок буровых насосов, обеспечивающих требуемое качество поверхности // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №1. С. 69-74. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-69-74>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

DETERMINATION OF THE TREATMENT MODES OF MUD PUMP CYLINDER LINERS THAT ENSURE THE REQUIRED SURFACE QUALITY

Nekrasov R.Yu.

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). Quality parameters of the surface layer, in particular surface roughness, are standardized design documentation. This makes it mandatory to provide them further during the manufacturing process of machine parts and assemblies. Drilling pump cylinder units are no exception. Actuating surfaces of their units are subject to increased requirements for surface roughness. Boring is used as a finishing method for such parts. At the same time, an important issue is the appointment of cutting modes, which should provide the required surface quality parameters. When processing materials with special properties, the problem of the lack of recommendations for cutting modes arises. This problem can be solved either through experimental research or using theoretical calculations. This paper provides justification for the possibility of using theoretical dependencies to assign cutting modes when processing materials with inverse hardness distribution. **Objectives.** The research is aimed at developing an approach to determine the cutting modes at finishing of materials with inverse hardness distribution, which allow to provide required parameters of surface quality. **Methods Applied.** The paper uses methods of mechanical engineering technology, cluster analysis, approximation. **Originality.** Based on calculations using theoretical formulas that take into account the features of the surfaces roughness formation, technological cutting modes are determined that can be used in the final turning of parts made of materials with inverse hardness distribution. **Result.** In the course of the work, calculations have been made of the arithmetic mean deviation of the profile, which is in the form of components generated by the kinematics and geometric parameters of the cutting process, vibration processes in the technological system, roughness of working surfaces of the tool and elastic deformations. The calculation has been made taking into account the peculiarities of the processed material (the inverse nature of the hardness distribution). Subsequent experimental verification has shown the consistency of the results obtained. Based on the use of cluster analysis, mode values have been determined that provide the required level of quality. **Practical Relevance.** As a result of the studies, recommendations have been obtained on the modes of mechanical processing of parts that are made of materials with inverse hardness distribution. The advantage of using the obtained results in practice is the versatility of the apparatus used. Theoretically, cutting modes can be determined when processing with a tool with different geometry and holders. It is also possible to calculate when changing the configuration of a layer with inverse hardness distribution. Thus, the process of technological preparation of production can be improved

Keywords: treatment, surface quality, roughness, modes, provision

For citation

Nekrasov R.Yu. Determination of the Treatment Modes of Mud Pump Cylinder Liners that Ensure the Required Surface Quality. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 1, pp. 69-74. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-69-74>

Введение

Шероховатость исполнительных поверхностей деталей и узлов машин относится к обязательным для технологического обеспечения параметрам, наряду с точностью размеров и другими показателями, которые регламентированы конструкторской документацией [1, 2]. При изготовлении продукции в условиях применения универсального оборудования получение требуемой шероховатости весьма часто реализуется посредством индивидуальной доработки поверхностей, в том числе за счет абразивной обработки. При использовании подхода, который базируется на использовании предварительной настройки станка, необходимо выставить такие значения режимов резания, которые будут гарантировать достижение требу-

емых параметров качества обработанной поверхности (включая и шероховатость) [3, 4].

Для традиционных обрабатываемых материалов существуют типовые рекомендации по режимам резания [5, 6], однако чаще всего они не вполне ориентированы на чистовую обработку. И все равно требуется достаточно большой объем пробной обработки для коррекции режимов резания. Гораздо более проблемным является подбор режимов резания в случае обработки материалов с особыми свойствами. В данной статье рассматривается проблема обработки цилиндрических втулок, которые используются в конструкциях буровых насосов. Для изготовления рабочей части втулки используется ферритно-перлитный серый чугун, который имеет на поверхности упрочненный слой [7-9]. Отличительной особенностью в

данном случае является то, что слой по структуре соответствует высокоуглеродистой стали, имеющей мелкие включения графита сферической формы. Кроме того, распределение твердости по толщине слоя имеет обратный характер (в отличие от традиционных методов поверхностного упрочнения, так как цементация, здесь твердость, по толщине слоя возрастает). Указанные выше аспекты делают неприменимым использование традиционных нормативов и справочных данных для назначения режимов резания.

Выходом в данной ситуации может быть использование теоретических методик расчета режимов резания, которые обеспечивают получение требуемой шероховатости поверхности. Одной из первых моделей, которая реализовывала взаимосвязь между технологическими режимами и параметрами шероховатости поверхности, была известная зависимость, предложенная А.И. Исаевым [10]. Данная зависимость связывает между собой геометрические характеристики срезаемого слоя и кинематику процесса резания. В ней учитывается продольная подача S , мм/об, и радиус при вершине резца r , мм:

$$Rz = \frac{S^2}{8 \cdot r}. \quad (1)$$

Более поздними исследованиями было установлено, что применимость выражения (1) для определения величины технологических режимов имеет ограниченный характер. Объясняется это тем, что в формировании профиля шероховатости поверхности сказываются процессы деформаций, вибрации элементов технологической системы, а также происходит копирование шероховатости рабочих поверхностей инструмента на обработанную поверхность. С учетом перечисленных аспектов, схема образования профиля при токарной обработке представлена на **рис. 1** [11-13].

Выражение для теоретического определения высоты микронеровностей по 10-ти точкам имеет вид

$$Rz = h_1 + h_2 + h_3 + h_4, \quad (2)$$

где h_1 – систематическая составляющая, которая зависит от геометрии и кинематики процесса обработки; h_2 – составляющая, которая зависит от вибраций вершины резца; h_3 – составляющая, зависящая от упругого оттеснения; h_4 – составляющая, которая определяется шероховатостью лезвия резца.

Следует обратить внимание, что выражение (2) содержит показатель шероховатости по 10-ти точкам, для чистовой токарной обработки его можно перевести в среднеарифметическое отклонение профиля, используя соответствующие формулы [14-16].

Целью работы является разработка подхода к определению режимов резания при чистовой обработке материалов с обратным распределением твердости, которые позволяют обеспечить требуемые параметры качества поверхности.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач:

- определить расчетным путем величину режимов резания при обработке материалов с обратным распределением твердости;
- произвести экспериментальную проверку обоснованности полученных значений режимов резания с точки зрения обеспечения;
- определить наиболее рациональные значения режимов резания с точки зрения обеспечения требуемых параметров качества поверхности при чистовой токарной обработке втулок цилиндров буровых насосов, которые изготовлены из чугуна упрочненным слоем, имеющим обратное распределение твердости.

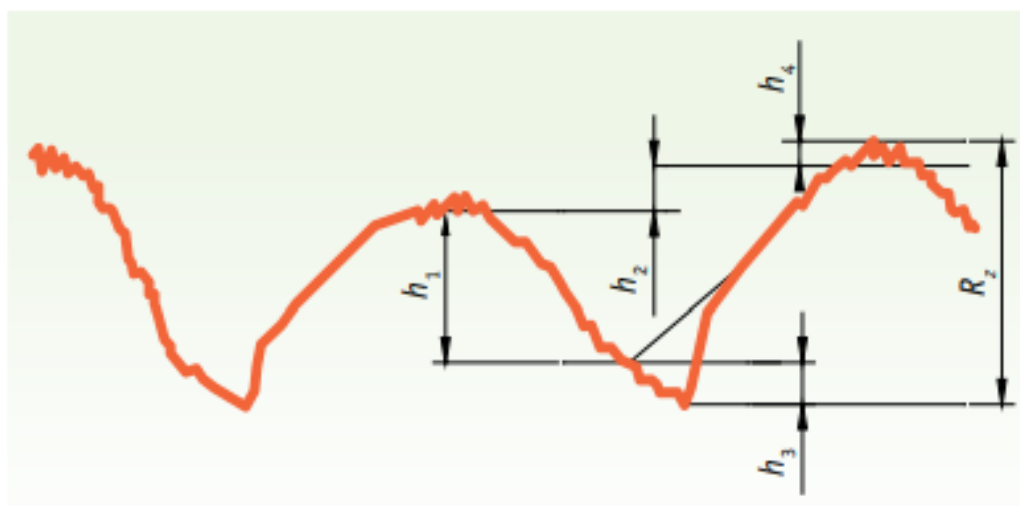


Рис. 1. Схема образования микропрофиля при токарной обработке
Fig 1. Scheme of microprofile formation during turning

Материалы и методы исследования

Учитывая, что обработка ведется с малыми значениями подачи, выражение для определения систематической составляющей имеет вид

$$h_1 = r \cdot (1 - \cos \varphi_1) + \sin \varphi_1 \cdot \left(S \cos \varphi_1 - \sqrt{S \cdot \sin \varphi_1 \cdot (2r - S \cdot \sin \varphi_1)} \right), \quad (3)$$

где r – радиус при вершине резца, мм; φ_1 – вспомогательный угол в плане.

Составляющая, зависящая от вибраций, определяется по формуле

$$h_2 = \frac{c_y \cdot S^{y_{py}} \cdot V^{z_{py}} \cdot \left[HB_{\max}^n \cdot t^{x_{py}} - HB_{\min}^n \cdot (t - Rz_{ис})^{x_{py}} \right]}{J_{ТС}}, \quad (4)$$

где $c_y, y_{py}, x_{py}, z_{py}, n$ – поправочные коэффициенты; HB_{\max} и HB_{\min} – максимальная и минимальная твердость обрабатываемого материала; $Rz_{ис}$ – шероховатость, полученная на предыдущем переходе, мкм; $J_{ТС}$ – жесткость технологической системы.

Величину составляющей h_3 можно определить по формуле

$$h_3 = \frac{b_{сдв}}{\frac{1}{\operatorname{tg} \varphi_1} + \frac{2 \cdot r}{S}}, \quad (5)$$

где $b_{сдв}$ – величина пластического оттеснения.

$$b_{сдв} = 0,5 \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{\tau_{сдв}}{\sqrt{\tau_{сдв}^2 + \sigma_T^2}} \right), \quad (6)$$

где $\tau_{сдв}$ – прочность материала на сдвиг, МПа; ρ – радиус округления режущей кромки, мм; σ_T – предел текучести обрабатываемого материала, МПа.

Составляющая h_4 принималась согласно данным производителей инструмента.

В качестве режущего инструмента рассматривались расточные резцы с пластинами из твердого сплава марки ВК8 геометрии DCMT, главный угол в плане $\varphi=93^\circ$, вспомогательный угол в плане $\varphi_1 = 32^\circ$, радиус при вершине $r = 1$ мм. Выбор режущего инструмента объяснялся тем, что данная марка хорошо изучена. Значения скорости резания принимались согласно рекомендациям технической литературы [15, 16]. Значения подачи варьировались в расчетах в диапазоне от 0,1 до 0,3 мм. Расчеты выполнялись с интервалом варьирования подачи в 0,05 мм/об.

Экспериментальная проверка производилась на токарном станке с числовым программным управлением марки DMC-310 ECOLINE. Измерение шероховатости обработанных образцов выполняли на профилемере марки АБРИС ПМ-7.

Полученные результаты и их обсуждение

На рис. 2 показан пример профиля обработанной поверхности, значения среднеарифметического отклонения профиля приведены в таблице.

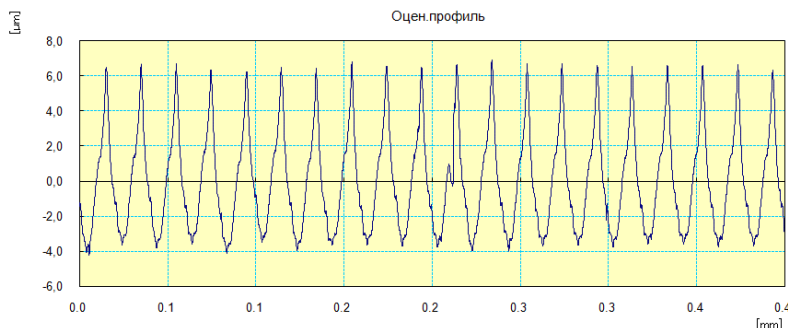


Рис. 2. Профилограмма поверхности, $t = 0,2$ мм, $S = 0,2$ мм/об, $V = 200$ м/мин

Fig 2. Surface profile, t is 0.2 mm, S is 0.2 mm/rev, V is 200 m/min

Таблица. Значения среднеарифметического отклонения профиля

Table. Arithmetic mean deviation of the profile

| № | S , мм/об | V , м/мин | t , мм | $Ra_{\text{теор}}$, МКМ | $Ra_{\text{эксп}}$, МКМ |
|----|-------------|-------------|----------|--------------------------|--------------------------|
| 1 | 0,1 | 200 | 0,2 | 0,96 | 1,05 |
| 2 | 0,15 | 200 | 0,2 | 1,63 | 1,79 |
| 3 | 0,2 | 200 | 0,2 | 2,31 | 2,55 |
| 4 | 0,25 | 200 | 0,2 | 3,04 | 3,34 |
| 5 | 0,3 | 200 | 0,2 | 3,76 | 4,16 |
| 6 | 0,1 | 200 | 0,35 | 1,36 | 1,48 |
| 7 | 0,15 | 200 | 0,35 | 2,41 | 2,64 |
| 8 | 0,2 | 200 | 0,35 | 3,36 | 3,72 |
| 9 | 0,25 | 200 | 0,35 | 4,29 | 4,72 |
| 10 | 0,3 | 200 | 0,35 | 5,18 | 5,65 |

По результатам обработки данных был выполнен кластерный анализ по методу дальнего соседа (с разделением на 5 кластеров по уровню качества от наилучшего до наихудшего). На **рис. 3** приведена дендрограмма для пары $S-Ra_{\text{экс}}$.

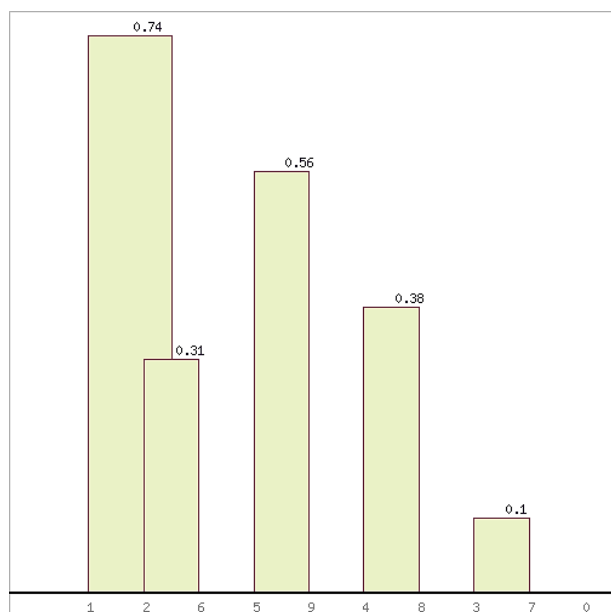


Рис. 3. Дендрограмма для пары факторов $S-Ra_{\text{экс}}$
Fig. 3. Dendrogram for $S-Ra_{\text{экс}}$ factor pair

Из **рис. 3** следует, что наилучший уровень качества достигается при вариантах 1, 2 и 6.

Заключение

В результате проведенных исследований можно сделать ряд выводов:

- на основе проведенных расчетов были определены значения режимов резания, которые обеспечивают получение требуемой шероховатости поверхности $Ra_{\text{теор}}$. Расчеты проводились для двух значений глубины резания, равных 0,2 и 0,35 мм;

- в ходе экспериментальной проверки полученных результатов было установлено, что погрешность между теоретическими и экспериментальными данными не превышает 15%. Данный результат можно считать достаточным для практической применимости;

- в результате использования кластерного анализа были выявлены наиболее рациональные значения режимов резания, обеспечивающие требуемые параметры шероховатости поверхности при обработке деталей из материалов с обратным распределением твердости;

- в качестве направлений для дальнейших исследований можно выделить изучение влияния износа режущего инструмента на получение требуемой шероховатости, а также исследование устойчивости колебательных процессов при растачивании.

Список источников

1. Харисов М.И., Забиров Ф.Ш. Обоснование направлений совершенствования клапанных пар поршневого бурового насоса с целью повышения наработки на отказ и герметичности // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». 2019. №2. С. 113-128.
2. Харисов М.И., Забиров Ф.Ш. Совершенствование конструкции клапанной пары бурового насоса // 69-я науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых: сб. матер. докл. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2018. 249 с.
3. Безязычный В.Ф. Метод подобия в технологии машиностроения: монография. М.: Инфра-инженерия, 2021. 356 с.
4. Кокорев Ю.А., Звягин Ф.В. Способы расчета точностных характеристик деталей и узлов приборов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. 211 с.
5. Козлов А.А., Козлов А.М. Расчет режимов резания: учебное пособие. Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2017. 96 с.
6. Дудак Н.С., Касенов А.Ж. Расчет режимов резания: учебное пособие. Алматы: Эверо, 2015. 128 с.
7. Патент RU № 2493289. Способ диффузионного титанирования изделий из чугуна // Овсянников В.Е., Гуревич Ю.Г., Фролов В.А., Суханов П.А.; заявитель и патентообладатель Курганский государственный университет. Оpubл. 20.09.2013. Бюл. № 26.
8. Гуревич Ю.Г., Овсянников В.Е., Фролов В.А. Диффузионное хромирование деталей из ферритноперлитного серого чугуна // Машиностроение и инженерное образование. 2011. № 2(27). С. 2-10. EDN NXNCZX.
9. Influence of Diffusional Surface Alloying on the Hardened-Layer Thickness for Gray-Iron Machine Parts / V.I. Vasil'ev, V.E. Ovsyannikov, R.Y. Nekrasov, Y.A. Tempel' // Russian Engineering Research. 2018, vol. 38, no. 11, pp. 901-903. DOI: 10.3103/S1068798X18110187. EDN VUSFYR.
10. Приходько В.М., Медеяев И.А., Фатюхин Д.С. Формирование эксплуатационных свойств деталей машин ультразвуковыми методами: монография. М.: МАДИ, 2015. 264 с. EDN: VIWSSH
11. Михайлов С.В. Методика расчета параметров сечения срезаемого слоя материала и направления схода стружки с инструмента / С.В. Михайлов, Д.С. Скворцов // Вестник КГТУ. 2004. № 9. С. 60–63.
12. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. М.: Машиностроение, 1987. 208 с.
13. Остапчук А.К., Овсянников В.Е. Синергетический подход к определению отклика технологической системы на внешнее воздействие // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2011. № 3(11). С. 36-41. EDN OIYAIF.
14. Анализ методов определения фрактальной размерности / В.И. Курдюков, А.К. Остапчук, В.Е. Овсянников, Е.Ю. Рогов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2008. № 5(69). С. 46-49. EDN JVZBLH.
15. Суслов А.Г. Инженерия поверхности деталей. М.: Машиностроение, 2009. 320 с. EDN UWWKQH.
16. Огар П.М., Горохов Д.Б., Турченко А.В. Механика контактирования шероховатых поверхностей. Братск: БрГУ, 2016. 282 с.

References

1. Kharisov M.I., Zabiroy F.Sh. Justification of the directions for improving the valve pairs of the piston drilling pump in order to increase the MTBF and tightness. *Setevoe izdanie «Neftegazovoe delo»* [Network publication Oil and Gas Business]. 2019;(2):113-128. (In Russ.)
2. Kharisov M.I., Zabiroy F.Sh. Improving the design of the valve pair of the drilling pump. *69-ya nauch.-tekhn. konf. studentov, aspirantov i molodykh uchenykh: sb. mater. dokl.* [69th scientific and technical conference of undergraduates, graduate students and young scientists. Collection of reports]. Ufa: Publishing House of USPTU, 2018, 249 p. (In Russ.)
3. Bezyazuchnuy V.F. *Metod podobiya v tekhnologii mashinostroeniya: monografiya* [Similarity method in mechanical engineering technology: monograph]. Moscow: Infra Engineering, 2021, 356 p. (In Russ.)
4. Kokorev Yu.A., Zvyagin F.V. *Sposoby rascheta tochnostnykh kharakteristik detaley i uzlov priborov* [Methods for calculating the accuracy characteristics of parts and assemblies of devices]. Moscow: Publishing House of MSTU named after N.E. Bauman, 2018, 211 p. (In Russ.)
5. Kozlov A.A., Kozlov A.M. *Raschet rezhimov rezaniya* [Calculation of cutting modes]. Lipetsk: LSTU Publishing House, 2017, 96 p. (In Russ.)
6. Dudak N.S., Kasenov A.Zh. *Raschet rezhimov rezaniya* [Calculation of cutting modes]. Almaty: Evero, 2015, 128 p. (In Russ.)
7. Ovsyannikov V.E., Gurevich Yu.G., Frolov V.A., Sukhanov P.A. *Sposob diffuzionnogo titanirovaniya izdeliy iz chuguna* [Method of diffusion titaniation of cast iron products]. Patent RU, no. 2493289, 2013.
8. Gurevich Yu.G., Ovsyannikov V.E., Frolov V.A. Diffusion chrome plating of parts from ferrite-pearlitic gray cast iron. *Mashinostroenie i inzhenernoe obrazovanie* [Mechanical engineering and engineering education]. 2011;(2(27)):2-10. (In Russ.)
9. Vasilev V.I., Ovsyannikov V.E., Nekrasov R.Y., Tempel Y.A. Influence of Diffusional Surface Alloying on the Hardened-Layer Thickness for Gray-Iron Machine Parts. *Russian Engineering Research*. 2018;38(11):901-903. DOI 10.3103/S1068798X18110187.
10. Prikhodko V.M., Medelyaev I.A., Fatyukhin D.S. *Formirovanie ekspluatatsionnykh svoystv detaley mashin ultrazvukovymi metodami: monografiya* [Formation of operational properties of machine parts by ultrasonic methods: monograph]. Moscow: MADI, 2015, 264 p. (In Russ.)
11. Mikhailov S.V., Skvortsov D.S. Methodology for calculating the parameters of the section of the cut layer of material and the direction of chip release from the tool. *Vestnik KGTV* [Bulletin of KSTU]. 2004;(9):60-63. (In Russ.)
12. Suslov A.G. *Tekhnologicheskoe obespechenie parametrov sostoyaniya poverkhnostnogo sloya detaley* [Technological support of the state parameters of the parts surface layer]. Moscow: Mashinostroeniye, 1987, 208 p. (In Russ.)
13. Ostapchuk A.K., Ovsyannikov V.E. Synergistic approach to determining the response of a technological system to external influences. *Vestnik Uralskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Ural State University of Railways]. 2011;(3(11)):36-41. (In Russ.)
14. Kurdyukov V.I., Ostapchuk A.K., Ovsyannikov V.E., Rogov E.Yu. Analysis of methods for determining fractal dimension. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Kuzbass State Technical University]. 2008;(5(69)):46-49. (In Russ.)
15. Suslov A.G. *Inzheneriya poverkhnosti detaley* [Surface engineering of parts]. Moscow: Mashinostroeniye, 2009, 320 p. (In Russ.)
16. Ogar P.M., Gorokhov D.B., Turchenko A.V. *Mekhanika kontaktirovaniya sherohovatykh poverkhnostey* [Rough surface contact mechanics]. Bratsk: BrSU Publishing House, 2016, 282 p. (In Russ.)

Поступила 08.07.2025; принята к публикации 01.11.2025; опубликована 31.03.2026
Submitted 08/07/2025; revised 01/11/2025; published 31/03/2026

Некрасов Роман Юрьевич – кандидат технических наук, доцент,
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия.
Email: syncler@mail.ru. ORCID 0009-0002-0057-8550

Roman Yu. Nekrasov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia.
Email: syncler@mail.ru. ORCID 0009-0002-0057-8550



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.787

DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-1-75-87

ПОИСК ОПТИМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ ПОДШИПНИКОВОЙ СТАЛИ GCr15, ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ПОДВЕРГНУТЫХ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКЕ И ШЛИФОВАНИЮ

Петроченко С.В.¹, Федоров А.А.², Макашин Д.С.², Михайленко С.В.²

¹ООО «Нинбоский научно-исследовательский институт интеллектуальных станков, входящий в группу Китайских национальных институтов машиностроения», Нинбо, Китай

²Омский государственный технический университет, Омск, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Проблема, связанная с повышением износостойкости и усталостной прочности деталей, изготовленных из подшипниковой стали GCr15, является актуальной. Возросшие эксплуатационные требования перестают быть достигнутыми традиционными методами упрочнения деталей машин. В свою очередь, это может быть обеспечено за счет применения комбинированных методов поверхностного упрочнения, таких как лазерная закалка с последующей ультразвуковой упрочняющей обработкой. Однако на сегодняшний момент существует проблема, связанная с оптимизацией технологического процесса ультразвукового упрочнения деталей типа тел вращения, предварительно подвергнутых лазерной закалке и шлифовке дефектного слоя. **Цель работы.** Поиск оптимальных значений технологических параметров режима ультразвуковой упрочняющей обработки деталей типа тел вращения, изготовленных из подшипниковой стали GCr15, предварительно подвергнутых лазерной закалке и шлифованию дефектного оплавленного слоя для достижения требуемой шероховатости поверхности, максимальных значений остаточных напряжений сжатия и микротвердости на поверхности. **Используемые методы.** Основу экспериментальной части составил ротатбельный центральный композиционный план второго порядка. Измерения включали анализ шероховатости, остаточных напряжений и микротвердости на поверхности образцов. **Новизна.** Разработаны регрессионные зависимости для определения оптимальных значений технологических параметров режима ультразвуковой упрочняющей обработки тел вращения, изготовленных из подшипниковой стали GCr15, предварительно подвергнутых лазерной закалке и шлифованию дефектного слоя. **Результат.** Полученные зависимости позволяют с точностью не менее чем 95% определить значения параметров режима ультразвуковой упрочняющей обработки для обеспечения требуемых значений качества поверхностного слоя деталей, обеспечить высокую производительность процесса. **Практическая значимость.** Регрессионные зависимости могут быть использованы как для прогнозирования влияния технологических параметров режима ультразвуковой упрочняющей обработки на шероховатость, величину остаточных напряжений, микротвердость на поверхности, так и для поиска оптимальных значений параметров режима ультразвукового упрочнения шарикоподшипниковой стали GCr15.

Ключевые слова: ультразвуковая упрочняющая обработка, подшипниковая сталь, ротатбельный центральный композиционный план, шероховатость, микротвердость, остаточные напряжения

Авторы выражают признательность за предоставленную возможность проведения экспериментальной части исследования и финансовую поддержку, оказанную в рамках проекта Yongjiang talent project, грант № CIE23AM0105, CIE23AM0106.

© Петроченко С.В., Федоров А.А., Макашин Д.С., Михайленко С.В., 2026

Для цитирования

Поиск оптимальных значений технологических параметров режима ультразвуковой упрочняющей обработки тел вращения, изготовленных из подшипниковой стали GCr15, предварительно подвергнутых лазерной закалке и шлифованию / Петроченко С.В., Федоров А.А., Макашин Д.С., Михайленко С.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №1. С. 75-87. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-75-87>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

SEARCH FOR OPTIMAL VALUES OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE ULTRASONIC HARDENING TREATMENT MODE FOR ROTATIONAL BODIES MADE OF BEARING STEEL GCr15 PREVIOUSLY SUBJECTED TO LASER HARDENING AND GRINDING

Petrochenko S.V.¹, Fedorov A.A.², Makashin D.S.², Mikhailenko S.V.²

¹Ningbo Intelligent Machine Tool Research Institute Co., Ltd. of China National Machinery Institute Group, Ningbo, China

²Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The problem of increasing the wear resistance and fatigue strength of parts made of GCr15 bearing steel is relevant. The increased operational requirements are no longer achieved by traditional methods of hardening machine parts. In turn, this can be achieved through the use of combined surface hardening methods such as laser hardening followed by ultrasonic hardening treatment. However, at the moment there is a problem related to the optimization of the technological process of ultrasonic hardening of parts such as rotational bodies previously subjected to laser hardening and grinding of the defective layer. **Objectives.** The study is aimed at ascertaining the optimal values of the technological parameters of the ultrasonic hardening treatment of parts such as rotational bodies made of bearing steel GCr15. These parts were previously subjected to laser hardening and grinding of the defective fused layer in order to achieve the required surface roughness, maximum values of residual compressive stresses and microhardness on the surface. **Methods Applied.** The basis of the experimental part is a second order rotatable central composite plan. The measurements include the analysis of roughness, residual stresses, and microhardness on the surface of the samples. **Originality.** Regression equations have been developed to determine the optimal values of the technological parameters of the ultrasonic hardening treatment of rotational bodies made of GCr15 bearing steel previously subjected to laser hardening and grinding of the defective layer. **Result.** The obtained equations make it possible to determine with an accuracy of at least 95% the values of the parameters of the ultrasonic hardening treatment mode to ensure the required quality values of the surface layer of the parts, to ensure high process productivity. **Practical Relevance.** Regression equations can be used to forecast the effect of the technological parameters of the ultrasonic hardening treatment mode on roughness, residual stress, and microhardness on the surface, as well as to find optimal values for the parameters of the ultrasonic hardening mode of GCr15 ball-bearing steel.

Keywords: ultrasonic hardening treatment, bearing steel, rotatable central composite plan, roughness, microhardness, residual stress

The authors are grateful for the opportunity to conduct the experimental part of the study and the financial support provided within the framework of the Yongjiang talent project, grant no. CIE23AM0105, CIE23AM0106.

For citation

Petrochenko S.V., Fedorov A.A., Makashin D.S., Mikhailenko S.V. Search for Optimal Values of Technological Parameters of the Ultrasonic Hardening Treatment Mode for Rotational Bodies Made of Bearing Steel GCr15 Previously Subjected to Laser Hardening and Grinding. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 1, pp. 75-87. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-75-87>

Введение

Сталь GCr15, являющаяся аналогом стали ШХ15, широко используется для изготовления деталей подшипников, прецизионных измерительных инструментов, штампов, вращающихся устройств, станков и автомобилей [1]. Всеобщая популярность этой стали в вышеуказанных областях применения обусловлена привлекательным сочетанием низкой стоимости, высокой прокаливаемости, высокой твердости (61-63 HRC), высокого предела текучести/растяжения (2000/2200 МПа), а также хорошей обрабатываемости и формруемости [2, 3]. Однако высокая степень истирания/износа часто усиливает трение, создает шум/вибрацию, требует своевременной замены и/или приводит к преждевременному выходу из строя.

Кроме того, при работе в тяжелых условиях эксплуатации и при больших нагрузках время от времени обнаруживается недостаточная контактная усталость и ударная вязкость в объеме. Для повышения износостойкости и усталостной прочности рабочих поверхностей деталей применяются традиционные методы термического упрочнения, сочетающие в себе сфероидизирующий отжиг, закалку и низкий отпуск [4, 5]. Несмотря на плюсы традиционных методов термического упрочнения, есть и недостатки, связанные с появлением закалочных трещин и деформации деталей, что недопустимо в особенности для тел вращения. Все эти недостатки могут быть нивелированы за счет применения ультразвуковой упрочняющей обработки, выполненной после лазерной закалки.

Ультразвуковая упрочняющая обработка (УУО) и ее разновидности (в частности, Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification – UNSM) может преодолеть недостаток, связанный с ухудшением качества поверхности [6-10]. Благодаря своей управляемости УУО может регулировать шероховатость поверхности в диапазоне от 0,04 до 0,5 мкм и создавать однородную пластическую деформацию и остаточные напряжения сжатия в приповерхностной области, предотвращая износ и распространение микротрещин.

Работа Yuon Y.S. и др. посвящена исследованию влияния UNSM-обработки на трибологические свойства подшипниковой стали, которая показала положительные результаты [11]. Naifeng Qin и др. исследовали влияние UNSM-обработки на износостойкость образцов и стойкость к микро- и макропиттингу [12]. Авторы отмечали наличие более тонкой кристаллической структуры на глубине около 4 мкм от поверхности, что соответствует измельченному мартенситу, полученному после обычной закалки и низкого отпуска. Также авторами оценено увеличение микротвердости образцов после UNSM-обработки в 1,3-1,4 раза по сравнению с исходными образцами. В работе Wang Y. и др. приведены результаты рентгеноструктурного анализа образцов после ультразвуковой прокатки (ultrasonic rolling) с исходной структурой до закалки и после закалки [13].

В приведенных авторами результатах говорится о том, что с повышением статической силы прижима инструмента высота дифракционного пика уменьшается, в то время как ширина дифракционного пика увеличивается, что свидетельствует о непрерывном измельчении зерен как для образцов до закалки, так и после нее. Результаты микроструктурного анализа обработанных образцов также показали измельчение зерен в приповерхностном слое после ультразвуковой прокатки, в особенности в образце после закалки.

Атапов А. и др. [14] в своей работе указали на повышенную деформацию кристаллической решетки в результате проведения UNSM при различных температурных режимах закаленной подшипниковой стали AISI 52100 (аналог ШХ15 и GCr15) и измельчение исходных мартенситных зерен и карбидных включений в приповерхностном слое. Кроме этого, авторы наблюдали формирование плотного слоя толщиной не более 5 мкм, который расценивался как «белый» слой. Хуе Xianmeng и др. [15] также отметили измельчение мартенситных зерен и их деформацию в направлении движения инструмента. Толщина упрочненного слоя после интенсивной пластической

деформации, вызванной ультразвуковой поверхностной накаткой, составляла 60 мкм. Высокая степень дислокации авторами объясняется вращением дислокационных ячеек с образованием малоугловых границ зерен и субзерен.

На сегодняшний день актуальными являются комбинированные способы упрочняющей обработки, способные значительно повысить качество несущего слоя [16]. В частности, многообещающим является сочетание лазерной закалки и ультразвуковой упрочняющей обработки [17-21]. Однако требует оптимизации процесс УУО для деталей типа тел вращения, предварительно обработанных лазером и шлифованным дефектным слоем.

Цель данной работы – поиск оптимальных значений технологических параметров режима УУО для тел вращения, изготовленных из подшипниковой стали GCr15, предварительно подвергнутых лазерной закалке и шлифованию дефектного оплавленного слоя для достижения шероховатости поверхности $Ra \leq 0,2$ мкм, максимальных значений остаточных напряжений сжатия и микротвердости на поверхности.

Материалы и методы исследования

Химический состав и механические свойства подшипниковой стали марки GCr15 представлены в табл. 1 и 2. Для проведения экспериментальных исследований из основного материала – отожженного прутка диаметром 50 мм – были изготовлены ролики, параметры которых приведены на рис. 1. Исходная шероховатость наружной цилиндрической поверхности перед лазерной закалкой роликов составляла $Ra = 0,08-0,09$ мкм.

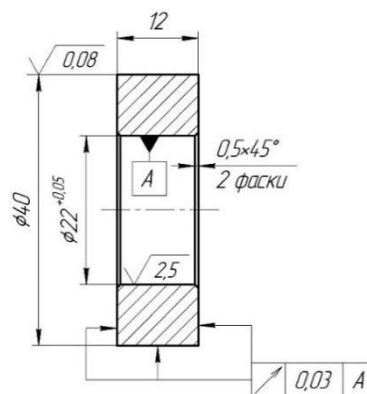


Рис. 1. Образец для проведения эксперимента
Fig. 1. A sample for conducting an experiment

Таблица 1. Химический состав стали GCr15

Table 1. Chemical composition of GCr15 steel

| Марка стали | Содержание элементов | C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Cu | Mo | Fe |
|-------------|----------------------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|--------|
| GCr15 | | 0,99 | 0,24 | 0,29 | 0,021 | 0,001 | 1,46 | 0,04 | 0,02 | 0,01 | основа |

Таблица 2. Механические свойства стали GCr15

Table 2. Mechanical properties of GCr15 steel

| Предел текучести, МПа | Предел прочности при растяжении, МПа | Относительное удлинение, % | Твердость по Виккерсу |
|-----------------------|--------------------------------------|----------------------------|-----------------------|
| 370–410 | 590-730 | 20 | 179-207 |

Экспериментальный процесс предварительной лазерной заковки был реализован на роботизированном комплексе LMS4000-70R-600A, в состав которого входят высокомогншнй диодный лазер LDF6000-30 (длина волны излучения — 1080 нм), оптическая головка OTZ-5VR, пирометр с системой терморегулирования LASCON, а также промышленный робот KUKA KR70R2100. Схематическое описание технологии лазерной заковки представлено на рис. 2. Параметры режима лазерной заковки, такие как скорость вращения образцов 15 мм/с, размер пучка 10×2 мм, мощность излучения 1500 Вт, назначались согласно ранее проведенным исследованиям [22]. Каждый образец закаливался за один оборот шпинделя установки с дискретным смещением оптической головки на шаг, равный ширине образца.

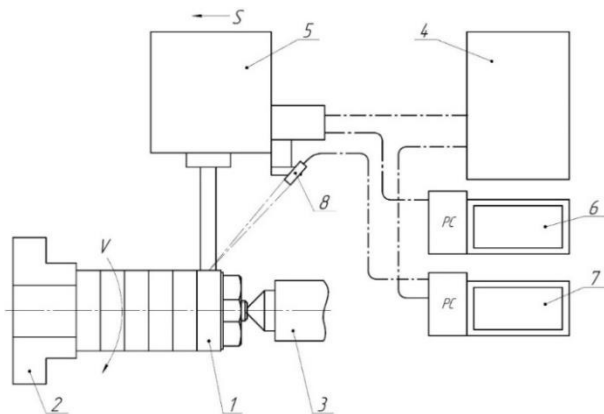


Рис. 2. Схема лазерной заковки: 1 – заготовка; 2 – патрон; 3 – задний центр; 4 – источник лазерного излучения; 5 – оптическая головка; 6 – контроллер ЧПУ; 7 – контроллер температуры; 8 – пирометр

Fig. 2. Laser hardening scheme: 1 is sample; 2 is chuck; 3 is rear center; 4 is laser radiation source; 5 is optical head; 6 is CNC controller; 7 is temperature controller; 8 is pyrometer

Для определения глубины дефектного слоя контрольный образец после лазерной заковки разрезался на две половины в плоскости, как представлено на рис. 1. Одна из поверхностей шлифовалась, травми-

лась до выявления микроструктуры. Инструментальным методом было определено, что глубина оплавленного слоя составила приблизительно 250-300 мкм. Далее все образцы шлифовались на глубину 300 мкм для удаления оплавленного слоя до шероховатости $Ra = 0,45-0,50$ мкм. Микротвердость на поверхности образцов перед УУО составила 610-620 HV.

УУО роликов проводилась согласно матрице планирования для ротатбельного центрального композиционного плана (РЦКП) второго порядка, предусматривающего двадцать опытов для количества факторов, равного трем [23]. Факторы, уровни, интервалы варьирования факторов и матрица планирования РЦКП второго порядка для трех факторов представлены в виде табл. 3 и 4.

В качестве варьируемых факторов были выбраны следующие параметры: скорость вращения образцов (V , мм/с) с кодированным значением (A); статическая сила прижима (F , Н) с кодированным значением (B), а также подача ультразвукового инструмента (S , мм/об) с кодированным значением (C). Уровни факторов и соответствующие интервалы их варьирования определены на основе результатов серии предварительных испытаний. Остальные технологические параметры УУО, включая частоту колебаний $f = 17500$ Гц и радиус вершины ультразвукового инструмента $r = 2,5$ мм, были зафиксированы как постоянные значения. В качестве выходных параметров (откликов) выступали показатель шероховатости поверхности Ra , мкм, микротвердость поверхности HV и уровень остаточных напряжений σ , МПа, в приповерхностном слое.

Ожидается, что применение РЦКП второго порядка для трехфакторного эксперимента позволит получить уравнения регрессии, включающие линейные, квадратичные члены и взаимодействия факторов. Такие модели описывают зависимость отклика от трех переменных с учетом их квадратичных и парных взаимодействий, что характерно для полиномиальных регрессионных уравнений второго порядка. Коэффициенты уравнения определяются на основе экспериментальных данных, а структура модели обеспечивает минимизацию систематических ошибок, связанных с неадекватностью аппроксимации.

Таблица 3. Уровни, факторы и интервалы варьирования
Table 3. Levels, factors, and ranges of variation

| Уровень фактора | Факторы | | |
|-----------------------|--|---|---|
| | A (скорость вращения образцов V , мм/с) | B (статическая сила прижима F , Н) | C (подача ультразвукового инструмента S , мм/об) |
| Основной (0) | 105 | 30 | 0,11 |
| Интервал варьирования | 50 | 10 | 0,03 |
| Верхний (+1) | 155 | 40 | 0,14 |
| Нижний (-1) | 55 | 20 | 0,08 |
| В звездных точках: | | | |
| +1,68179 | 189 | 47 | 0,16 |
| -1,68179 | 21 | 13 | 0,06 |

Таблица 4. Матрица планирования для ротatableльного центрального композиционного плана второго порядка
Table 4. The planning matrix for the second-order rotatable central composite plan

| Номер опыта | Кодированные значения факторов | | | Отклики | | |
|-------------|--------------------------------|----------|----------|-----------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|
| | A | B | C | Параметр шероховатости Ra , мкм | Остаточные напряжения σ , МПа | Поверхностная твердость HV |
| 1 | -1 | -1 | -1 | Ra_1 | σ_1 | HV_1 |
| 2 | 1 | -1 | -1 | Ra_2 | σ_2 | HV_2 |
| 3 | -1 | 1 | -1 | Ra_3 | σ_3 | HV_3 |
| 4 | 1 | 1 | -1 | Ra_4 | σ_4 | HV_4 |
| 5 | -1 | -1 | 1 | Ra_5 | σ_5 | HV_5 |
| 6 | 1 | -1 | 1 | Ra_6 | σ_6 | HV_6 |
| 7 | -1 | 1 | 1 | Ra_7 | σ_7 | HV_7 |
| 8 | 1 | 1 | 1 | Ra_8 | σ_8 | HV_8 |
| 9 | -1,68179 | 0 | 0 | Ra_9 | σ_9 | HV_9 |
| 10 | 1,68179 | 0 | 0 | Ra_{10} | σ_{10} | HV_{10} |
| 11 | 0 | -1,68179 | 0 | Ra_{11} | σ_{11} | HV_{11} |
| 12 | 0 | 1,68179 | 0 | Ra_{12} | σ_{12} | HV_{12} |
| 13 | 0 | 0 | -1,68179 | Ra_{13} | σ_{13} | HV_{13} |
| 14 | 0 | 0 | 1,68179 | Ra_{14} | σ_{14} | HV_{14} |
| 15 | 0 | 0 | 0 | Ra_{15} | σ_{15} | HV_{15} |
| 16 | 0 | 0 | 0 | Ra_{16} | σ_{16} | HV_{16} |
| 17 | 0 | 0 | 0 | Ra_{17} | σ_{17} | HV_{17} |
| 18 | 0 | 0 | 0 | Ra_{18} | σ_{18} | HV_{18} |
| 19 | 0 | 0 | 0 | Ra_{19} | σ_{19} | HV_{19} |
| 20 | 0 | 0 | 0 | Ra_{20} | σ_{20} | HV_{20} |

$$y = b_0 + b_1A + b_2B + b_3C + b_{12}AB + b_{13}AC + b_{23}BC + b_{11}A^2 + b_{22}B^2 + b_{33}C^2, \quad (1)$$

где $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{11}, b_{22}, b_{33}, b_{12}, b_{13}, b_{23}$ – коэффициенты получаемого уравнения регрессии.

Для построения регрессионных моделей и генерации контурных диаграмм поверхностей отклика использовался программный комплекс Design Expert 13. Графический анализ результатов и оптимизация режимов ультразвуковой обработки (УУО) подшипниковой стали GCr15 осуществлялись на основе методологии поверхности отклика, позволяющей установить корреляцию между входными технологическими параметрами и выходными характеристиками процесса. Статистическая достоверность разработанных регрессионных моделей была подтверждена посредством дисперсионного анализа (ANOVA). Программное обеспечение обеспечило трёхмерную визуализацию поверхностей отклика, а также предоставило возможности для интерактивного исследования графических зависимостей и уточнения оптимальных условий обработки.

УУО производилась на установке, собранной на базе токарно-винторезного станка. Схема УУО представлена на рис. 3. Нагрузка на образец осуществлялась за счет продольного перемещения динамического технологического модуля (ДТМ), установленного в резцедержателе станка, вдоль оси Y. Контроль нагрузки осуществлялся при помощи тарированной пружины.

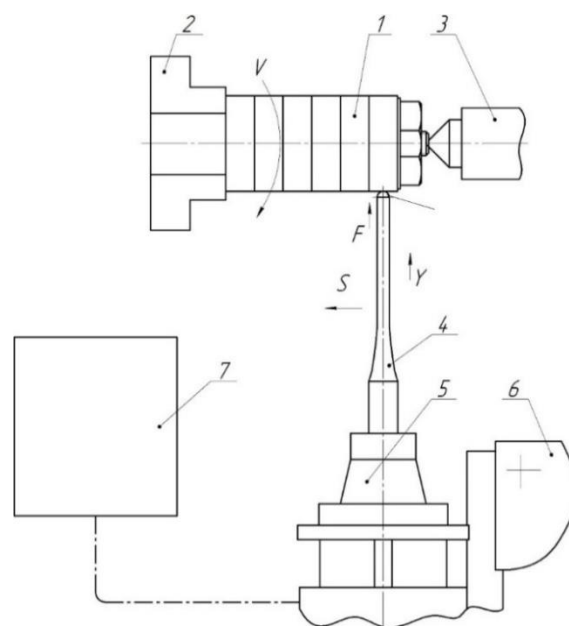


Рис. 3. Схема ультразвуковой упрочняющей обработки: 1 – заготовка; 2 – патрон; 3 – задний центр; 4 – ультразвуковой инструмент с полуцилиндрическим наконечником; 5 – магнитострикционный преобразователь в корпусе ДТМ; 6 – резцедержатель токарного станка; 7 – ультразвуковой генератор

Fig. 3. The scheme of ultrasonic hardening treatment: 1 is sample; 2 is chuck; 3 is rear center; 4 is ultrasonic tool with a semi-cylindrical tip; 5 is magnetostrictive transducer in the DTM housing; 6 is lathe tool holder; 7 is ultrasonic generator

Образцы были смонтированы на оправке, установленной в самоцентрирующий трехкулачковый токарный патрон. УУО производилась за счет перемещения ДТМ вдоль оси X относительно вращающейся заготовки с определённой величиной подачи. Параметры ультразвукового инструмента были выбраны следующие – наконечник в виде полуцилиндрической твердосплавной пластины шириной 5 мм. Обработка выполнялась за один проход. Технологические параметры режима УУО назначались согласно табл. 3 и 4.

Измерение шероховатости на поверхности образцов проводилось на профилометре модели TR-220 Time Group. Величина остаточных напряжений определялась на рентгеновском дифрактометре Xstress модели 3000G2 при использовании программного обеспечения XTronic.

Измерение поверхностной твердости осуществлялось с использованием твердомера HUAYIN HV-1000A. В качестве индентора применялась алмазная пирамида Виккерса, имеющая четырехгранную форму. Нагрузка величиной 500 г поддерживалась в течение 10 с. Для обеспечения достоверности результатов на каждом образце проводилось не менее пяти серий вдавливания. Для измерения поверхностной твердости роликов применялась методика, учитывающая кривизну поверхности. Скорректированная измеренная длина диагонали вычислялась по формуле

$$d_{corrected} = d_{measured} \cdot \left(1 + \frac{d_{measured}}{4R} \right), \quad (2)$$

где $d_{corrected}$ – скорректированная измеренная длина диагонали отпечатка, мм; $d_{measured}$ – измеренная длина диагонали, мм; R – радиус поверхности образца, мм.

Таблица 5. Результаты эксперимента
Table 5. Experimental results

| Номер опыта | Кодированные значения факторов | | | Отклики | | |
|-------------|--------------------------------|----------|----------|--------------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| | A | B | C | Параметр шероховатости Ra, мкм | Остаточные напряжения σ, МПа | Микротвердость на поверхности HV |
| 1 | -1 | -1 | -1 | 0,2204 | -770 | 732 |
| 2 | 1 | -1 | -1 | 0,3038 | -646,6 | 702 |
| 3 | -1 | 1 | -1 | 0,1926 | -859,85 | 821 |
| 4 | 1 | 1 | -1 | 0,1806 | -792 | 770 |
| 5 | -1 | -1 | 1 | 0,2692 | -656,2 | 741 |
| 6 | 1 | -1 | 1 | 0,4412 | -647,95 | 712 |
| 7 | -1 | 1 | 1 | 0,2184 | -678,3 | 754 |
| 8 | 1 | 1 | 1 | 0,2412 | -730,1 | 728 |
| 9 | -1,68179 | 0 | 0 | 0,2022 | -783 | 803 |
| 10 | 1,68179 | 0 | 0 | 0,2776 | -654 | 707 |
| 11 | 0 | -1,68179 | 0 | 0,34 | -584 | 647 |
| 12 | 0 | 1,68179 | 0 | 0,2126 | -664,45 | 729 |
| 13 | 0 | 0 | -1,68179 | 0,1596 | -1001,43 | 829 |
| 14 | 0 | 0 | 1,68179 | 0,3442 | -761,4 | 744 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 0,2056 | -815,4 | 775 |
| 16 | 0 | 0 | 0 | 0,21 | -803,5 | 767 |
| 17 | 0 | 0 | 0 | 0,198 | -827,7 | 778 |
| 18 | 0 | 0 | 0 | 0,204 | -800,1 | 768 |
| 19 | 0 | 0 | 0 | 0,203 | -820,7 | 769 |
| 20 | 0 | 0 | 0 | 0,202 | -815,2 | 771 |

Полученные результаты и их обсуждение

Результаты эксперимента по поиску оптимальных технологических параметров режима УУО представлены в табл. 5.

Полученные результаты дисперсионного анализа, представленные в табл. 6, включают значения F-критерия и p-критерия для каждого исследуемого фактора. На основании анализа указанных показателей была установлена статистическая значимость отдельных факторов процесса.

На основе проведенного дисперсионного анализа установлено, что параметр шероховатости Ra зависит от всех трех исследуемых факторов, демонстрируя высокую статистическую значимость (значение p-критерия < 0,0001) (см. табл. 6). Основное влияние на увеличение Ra оказывает скорость вращения, что связано со снижением жесткости системы станок-приспособление-инструмент-деталь и возрастанием вибраций во время обработки. Статическая сила прижима влияет на шероховатость за счет выглаживающего эффекта: при ее увеличении вершины микровыступов сглаживаются, что уменьшает Ra. Однако квадратичная зависимость силы прижима также оказывает существенное влияние (значение p-критерия = 0,0002), что указывает на нелинейность процесса. Следует учитывать риск перенаклепа при чрезмерном повышении силы, который может вызвать шелушение поверхности и резкий рост Ra. Кроме того, увеличение подачи ультразвукового инструмента приводит к усугублению шероховатости из-за расширения шага сканирования, что снижает точность обработки.

Таблица 6. Результаты дисперсионного анализа
Table 6. ANOVA results

| Фактор | Отклики | | | | | |
|--|--------------------------------|------------------------|---|------------------------|-----------------------------------|------------------------|
| | Шероховатость поверхности Ra | | Величина остаточных напряжений σ | | Поверхностная микротвердость HV | |
| | Значение F -критерия | Значение p -критерия | Значение F -критерия | Значение p -критерия | Значение F -критерия | Значение p -критерия |
| A (скорость вращения образца) | 40,78 | < 0,0001 | 16,12 | 0,0025 | 49,74 | < 0,0001 |
| B (статическая сила прижима) | 100,20 | < 0,0001 | 27,32 | 0,0004 | 58,99 | < 0,0001 |
| C (подача ультразвукового инструмента) | 89,75 | < 0,0001 | 69,93 | < 0,0001 | 30,51 | 0,0003 |
| AB | 26,96 | 0,0004 | 2,76 | 0,1273 | 0,3110 | 0,5894 |
| AC | 6,86 | 0,0256 | 11,41 | 0,0070 | 0,6488 | 0,4393 |
| BC | 4,49 | 0,0602 | 3,55 | 0,0889 | 15,72 | 0,0027 |
| A^2 | 8,26 | 0,0165 | 32,15 | 0,0002 | 2,80 | 0,1254 |
| B^2 | 33,73 | 0,0002 | 117,03 | < 0,0001 | 91,24 | < 0,0001 |
| C^2 | 14,76 | 0,0033 | 10,41 | 0,0091 | 4,13 | 0,0695 |

Влияние технологических параметров режима УУО на остаточные напряжения при постоянной амплитуде и частоте колебаний инструмента следующее:

– при уменьшении подачи ультразвукового инструмента относительно вращающейся заготовки уменьшается степень перекрытия соседних точек контакта инструмента и заготовки, проработка поверхности происходит более качественно, инструмент дольше воздействует на зону обработки, усиливая деформацию [24];

– изменение силы статического прижима в диапазоне выбранных экспериментальных значений от 13 до 30 Н в натуральных значениях фактора указывает на тенденцию к росту сжимающих напряжений, что объясняется повышением степени деформации; дальнейшее повышение статической силы прижима приводит к уменьшению сжимающих напряжений, что по большей части объясняется уменьшением влияния амплитуды колебаний инструмента и трансформацией ультразвуковой ударной обработки в ультразвуковую выглаживающую [25];

– скорость вращения заготовки в выбранных пределах не оказывает столь значительного влияния на величину остаточных напряжений, по сравнению со степенью влияния статической силы прижима и подачи ультразвукового инструмента, однако есть опасность, что слишком высокая скорость обработки может привести к возникновению вибраций и неравномерному распределению напряжений.

Таблица 7. Значения коэффициентов детерминации
Table 7. Values of the coefficients of determination

| Коэффициент детерминации | Отклики | | |
|--|--------------------------------|---|------------------------------------|
| | Шероховатость поверхности Ra | Величина остаточных напряжений σ | Микротвердость на поверхности HV |
| Значение коэффициента детерминации R^2 | 0,9695 | 0,9669 | 0,9626 |
| Скорректированное значение коэффициента детерминации R^2 | 0,9420 | 0,9371 | 0,9289 |
| Прогнозируемое значение коэффициента детерминации R^2 | 0,7672 | 0,7669 | 0,7289 |

Поверхностная микротвердость зависит от всех трех факторов в первом порядке, а также в значительной степени от квадрата статической силы прижима, так как именно повышение статической силы прижима при постоянной амплитуде колебаний инструмента способствует большей пластической деформации зерен в приповерхностном слое [26].

По результатам регрессионного анализа были получены уравнения регрессии второго порядка (3)-(5) и определены значения коэффициентов детерминации (табл. 7).

$$Ra = 0,20238 + 0,0288A - 0,0451B + 0,0427C - 0,0306AB + 0,0154AC - 0,0125BC + 0,0126A^2 + 0,0255B^2 + 0,0169C^2; \quad (3)$$

$$\sigma = -814,23 + 26,70A - 34,77B + 55,62C - 29,35AC + 16,37BC + 36,71A^2 + 70,04B^2 - 20,89C^2; \quad (4)$$

$$HV = 771,22 - 21,78A + 23,72B - 17,06C - 160BC + 6,11C^2. \quad (5)$$

Для перехода от кодированных значений к натуральным используются выражения

$$V = 105 + 50A; \quad (6)$$

$$F = 30 + 10B; \quad (7)$$

$$S = 0,11 + 0,03C. \quad (8)$$

Прогнозируемые значения коэффициентов детерминации R^2 , равные 0,7672, 0,7669 и 0,7289 соответственно, находятся в разумном соответствии со скорректированными значениями R^2 , равными 0,942, 0,9371 и 0,9289 соответственно, то есть разница составляет менее 0,2.

Полученные уравнения регрессии могут быть использованы при поиске оптимальных значений технологических параметров УУО после предваритель-

ной лазерной закалки и шлифования, а также прогнозирования полученных откликов при желаемых значениях скорости обработки, статической силы прижима и величины подачи ультразвукового инструмента с погрешностью не более 5%.

Поиск оптимальных значений технологических параметров осуществлялся с применением метода поверхностного отклика. Контурные кривые поверхностей равного отклика приведены на рис. 4-6.

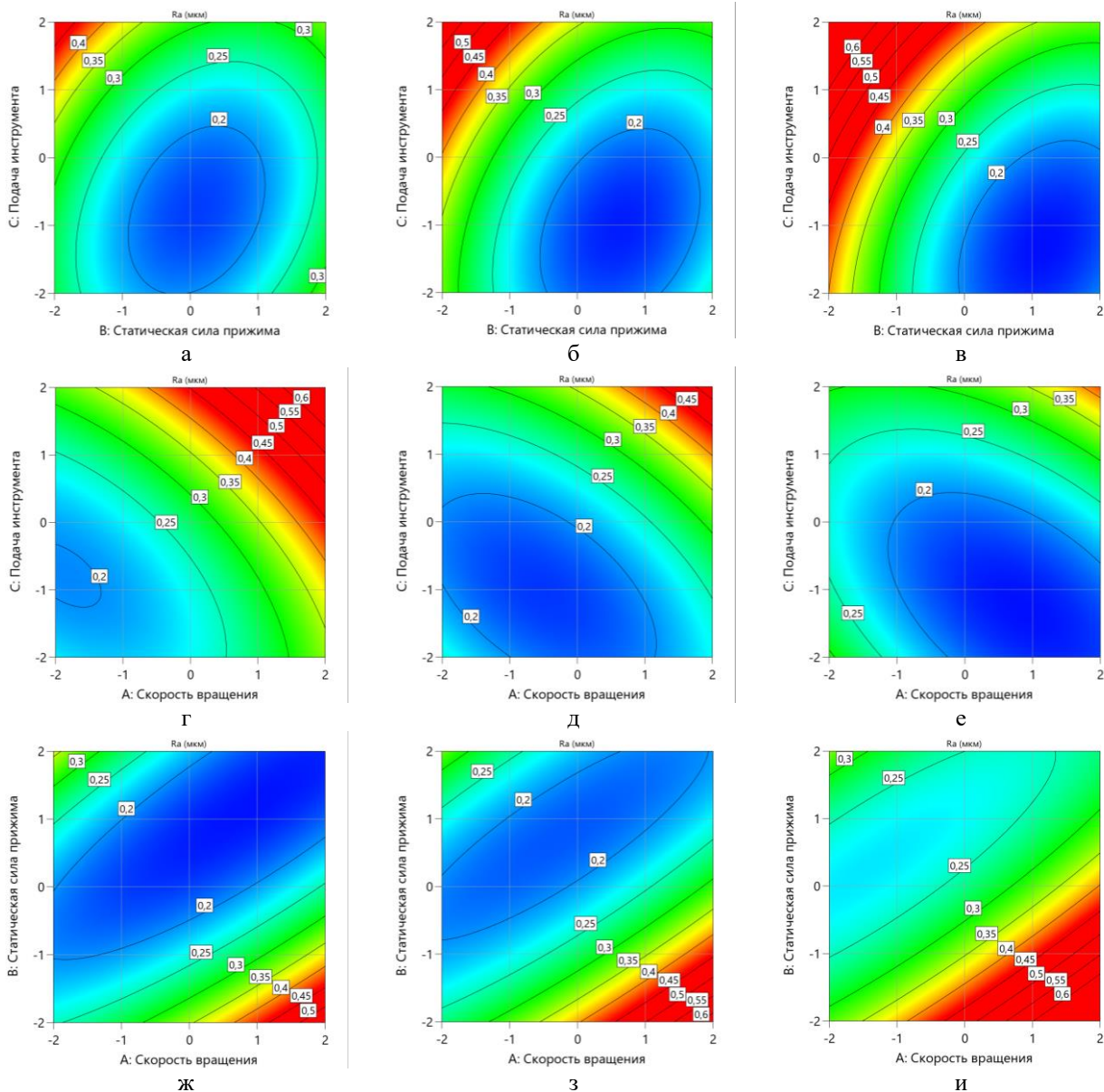


Рис. 4. Контурные кривые поверхностей равного отклика для параметра шероховатости Ra : а – $A = -1$; б – $A = 0$; в – $A = +1$; г – $B = -1$; д – $B = 0$; е – $B = +1$; ж – $C = -1$; з – $C = 0$; и – $C = +1$

Fig. 4. Contour curves of the top of the equal response for the roughness parameter Ra : а is $A = -1$; б is $A = 0$; в is $A = +1$; г is $B = -1$; д is $B = 0$; е is $B = +1$; ж is $C = -1$; з is $C = 0$; и is $C = +1$

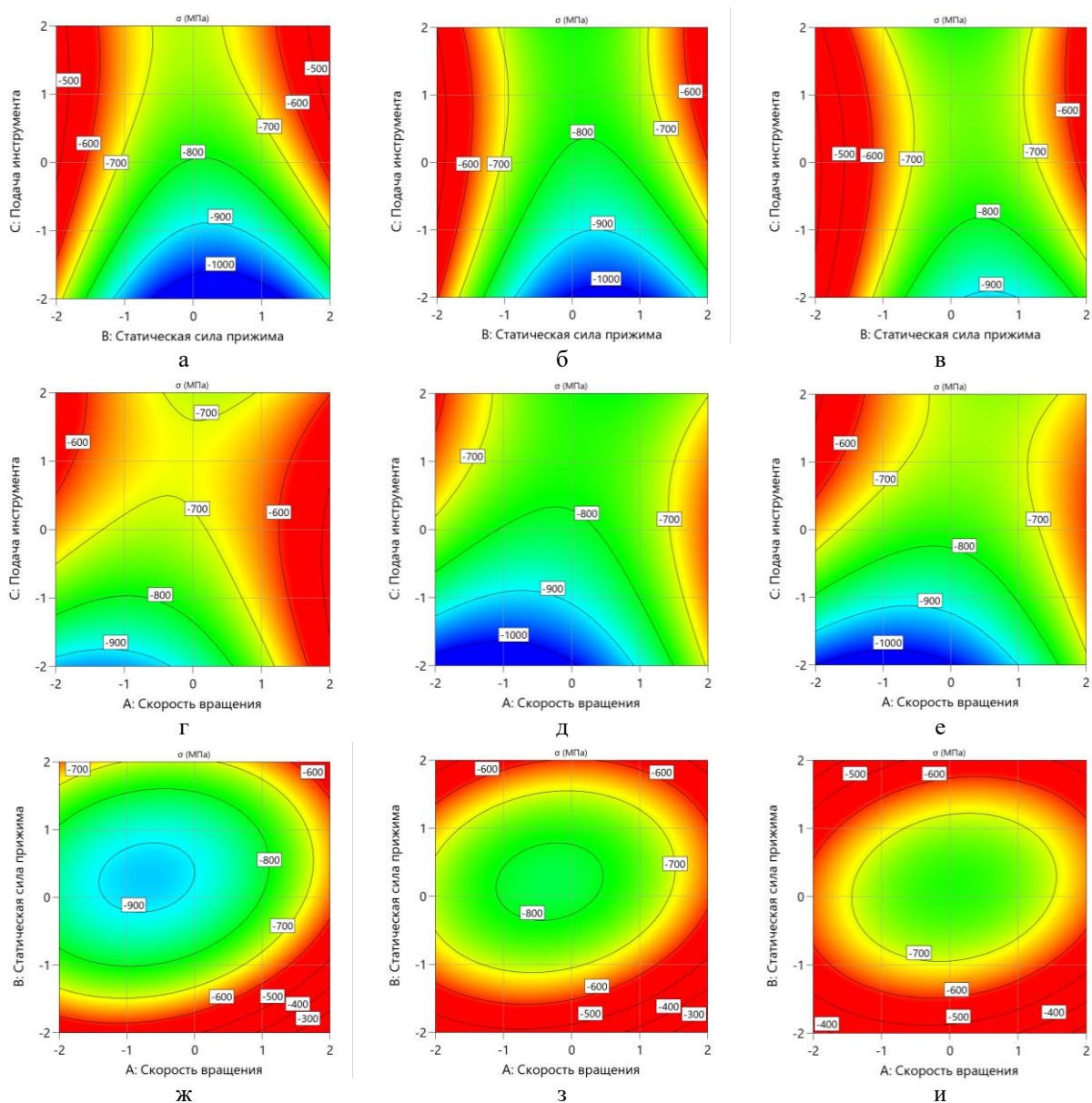


Рис. 5. Контурные кривые поверхностей равного отклика для остаточных напряжений σ :
 а – $A = -1$; б – $A = 0$; в – $A = +1$; г – $B = -1$; д – $B = 0$; е – $B = +1$; ж – $C = -1$; з – $C = 0$; и – $C = +1$

Fig. 5. Contour curves of the top of the equal response for the residual stress σ :

a is $A = -1$; б is $A = 0$; в is $A = +1$; г is $B = -1$; д is $B = 0$; е is $B = +1$; ж is $C = -1$; з is $C = 0$; и is $C = +1$

С целью определения оптимальных технологических параметров режима ультразвуковой обработки (УУО) были разработаны совмещенные контурные диаграммы поверхностей отклика, представленные на рис. 7.

При поиске оптимальных технологических параметров УУО были заданы следующие ограничения:

- параметр шероховатости $Ra \leq 0,2$ мкм;
- остаточные напряжения $\sigma \leq -700$ МПа;
- микротвердость на поверхности $HV \geq 750$.

С учетом обеспечения значений откликов в вышеуказанных пределах максимальная производительность обработки обеспечивается при значениях скорости вращения заготовки $V = 125$ мм/с (0,401 в кодированном значении фактора), статической силы прижима $F = 37$ Н (0,611) и величины подачи инструмента $S = 0,117$ (0,228), при этом параметр шероховатости составляет $Ra = 0,2$ мкм, остаточные напряжения $\sigma = -773$ МПа, микротвердость на поверхности $HV = 762$.

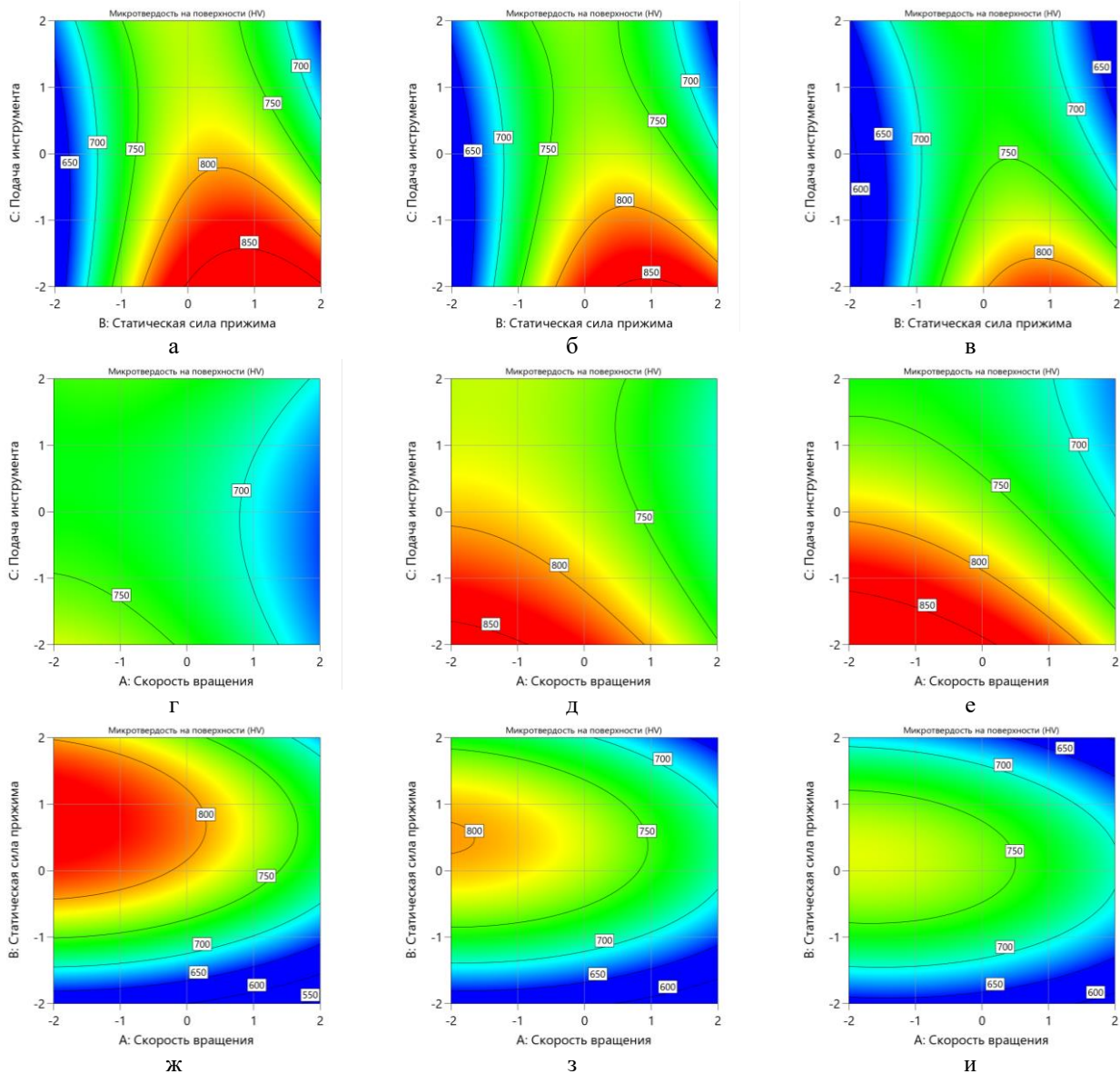


Рис. 6. Контурные кривые поверхностей равного отклика для микротвердости на поверхности:
 а – $A = -1$; б – $A = 0$; в – $A = +1$; г – $B = -1$; д – $B = 0$; е – $B = +1$; ж – $C = -1$; з – $C = 0$; и – $C = +1$
 Fig. 6. Contour curves of the top of the equal response for the surface microhardness:
 а is $A = -1$; б is $A = 0$; в is $A = +1$; г is $B = -1$; д is $B = 0$; е is $B = +1$; ж is $C = -1$; з is $C = 0$; и is $C = +1$



Рис. 7. Совмещенные контурные кривые поверхностей равного отклика: а – $A = -1$; б – $A = 0$; в – $A = +1$
 Fig. 7. Combined contour curves of surfaces of equal response: а is $A = -1$; б is $A = 0$; в is $A = +1$

Заключение

Был проведён промышленный эксперимент для определения оптимальных параметров ультразвуковой упрочняющей обработки (УУО).

Результаты дисперсионного анализа показали:

– комплексное влияние скорости обработки, статического усилия прижима инструмента и подачи на параметр шероховатости поверхности Ra ;

– значительное воздействие статической силы прижима и величины подачи инструмента на уровень остаточных сжимающих напряжений;

– существенное влияние квадрата статического усилия прижима на поверхностную микротвёрдость.

На основе регрессионного анализа были созданы адекватные математические модели, позволяющие прогнозировать влияние технологических параметров УУО на качество поверхностного слоя деталей вращения из подшипниковой стали GCr15, прошедших процесс лазерной закалки и шлифования слоя заготовки, имеющего дефекты.

Также установлены оптимальные значения параметров упрочняющей обработки, обеспечивающие заданные характеристики поверхности: шероховатость $Ra \leq 0,2$ мкм, максимальные остаточные напряжения сжатия $\sigma = -773$ МПа и высокую поверхностную твёрдость $HV = 762$.

Список источников

- Сапунов С.В. *Материаловедение*. СПб.: Лань, 2025. 208 с.
- Земсков Ю.П. *Материаловедение*. СПб.: Лань, 2024. 188 с.
- Богодухов С.И., Козик Е.С. *Материаловедение*. М.: Машиностроение, 2023. 504 с.
- Галимов, Э.Р., Абдуллин А.Л. *Современные конструкционные материалы для машиностроения*. СПб.: Лань, 2025. 268 с.
- Иванов, И.А., Губенко С.И., Кононов Д.П. *Поверхность деталей машин и механизмов*. СПб.: Лань, 2022. 156 с.
- Gradient nanostructure and residual stresses induced by ultrasonic nano-crystal surface modification in 304 austenitic stainless steel for high strength and high ductility / C. Ye, A. Telang, A.S. Gill, S. Suslov et al. // *Materials Science and Engineering: A*. 2019, no. 613, pp. 274–288.
- Effect of ultrasonic nanocrystalline surface modification on the microstructural evolution of Inconel 690 alloy / K. Li, Y. He, I.H. Cho, C.S. Lee et al. // *Materials and Manufacturing Processes*. 2015, no. 30, pp. 194–198.
- Effects of ultrasonic nanocrystalline surface modification (UNSM) technique on the tribological behavior of sintered Cu-based alloy / A. Amanov, Y.S. Pyun, S. Sasaki // *Tribology International*. 2014, no. 72, pp. 187–197.
- Surface amorphization of NiTi alloy induced by ultrasonic nanocrystal surface modification for improved mechanical properties / C. Ye, X. Zhou, A. Telang, H. Gao et al. // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2016, no. 53, pp. 455–462.
- Effect of ultrasonic nanocrystalline surface modification on the water droplet erosion performance of Ti-6Al-4V / A.K. Gujba, Z. Ren, Y. Dong, C. Ye et al. // *Surface and Coatings Technology*. 2016, no. 307, pp. 157–170.
- Tribological characteristics of radial journal bearings by ultrasonic nano-crystal surface modification technology / Y. Pyun, J.H. Park, C.M. Suh, I. Cho et al. // *International Journal of Modern Physics B*. 2010, no. 24, pp. 3011–3016.
- Effects of ultrasonic nanocrystal surface modification on the wear and micropitting behavior of bearing steel in boundary lubricated steel-steel contacts / H. Qin, Z. Ren, J. Zhao, C. Ye et al. // *Wear*. 2017, no. 392–393, pp. 177–186.
- Effect of ultrasonic rolling on the surface integrity and corrosion properties of GCr15 steel before and after quenching / Y. Wang, J. Lin, Y.S. Wang, X. Fu // *Materials Research Express*. 2022, no. 9, art. 056505.
- A Study on Surface Hardening and Wear Resistance of AISI 52100 Steel by Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification and Electrolytic Plasma Surface Modification Technologies / N. Magazov, Z. Satbaeva, B. Rakhadilov, A. Amanov // *Materials*. 2023, no. 16, art. 6824.
- Surface Microstructure Refinement and Mechanical Properties of GCr15 Steels Improved During Ultrasonic Surface Rolling Processing / X. Xue, S. Xu, X. Ma, J. Han, W. Zheng // *Materials Research*. 2023, vol. 26, art. e20220606.
- Триботехническое материаловедение и триботехнология: учеб. пособие / Денисова Н.Е., Шорин В.А., Гончарь И.Н., Волчихина Н.И., Шорина Н.С.; под общ. ред. Н.Е. Денисовой. Пенза: Пензенский государственный университет, 2006. 248 с.
- Comparison of Effects of Laser, Ultrasonic, and Combined Laser-Ultrasonic Hardening Treatments on Surface Properties of AISI 1045 Steel Parts / D. Lesyk, W. Alnusirat, S. Martínez, B. Mordiyuk et al. // *Advanced Manufacturing Processes III. InterPartner 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, 2022, pp. 313–322.
- Rolling contact fatigue behaviors of 25CrNi2MoV steel combined treated by discrete laser surface hardening and ultrasonic surface rolling / X. Hu, S. Qu, Z. Chen, P. Zhang, Z. Lu et al. // *Optics and Laser Technology*. 2022, no. 155, art. 108370.
- Layered hardening and grain structure refinement of low-alloyed tool steel applying two-stage surface morphology modification by laser phase transformation and ultrasonic peening / D. Lesyk, V. Dzhemelinskiy, B. Mordiyuk, S. Martínez et al. // *MRS Advances*. 2023, no. 8, pp. 988–995.
- Surface quality improvement of steel parts by combined laser-ultrasonic treatment: determination algorithm of technological parameters / D. Lesyk, V. Dzhemelinskiy, B. Mordiyuk, S. Martínez et al. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023, no. 2, pp. 17–26.
- Ultrasonic Surface Finishing of AISI 1045 Steel Hardened by Laser Heat Treatment with Fibre Laser and Scanning Optics: Layered-Structure-Induced Hardening and Enhanced Surface Morphology / D. Lesyk, B. Mordiyuk, W. Alnusirat, S. Martínez et al. // *Progress in Physics of Metals*. 2024, no. 25, pp. 822–867.

22. Finding Optimal Modes of Laser Hardening of GCr15 Bearing Steel / S.V. Petrochenko, Q. Hao, X. Yu, K. Zhao // Russian Engineering Research. 2025, no. 45, pp. 346–353.
23. Набатов В.В. Методы научных исследований. М.: МИСиС, 2020. 328 с.
24. Федоров А.А., Петроченко С.В. Спектральный метод контроля деталей после ультразвуковой упрочняющей обработки. Ч. 1 // Контроль. Диагностика. 2014. № 6. С. 65-72.
25. Полонякин Д.А., Федоров А.А., Гомонюк Т.М. Влияние статической нагрузки на структурно-фазовый состав нержавеющей стали 12Х18Н10Т, подвергнутой ультразвуковому нанокристаллическому поверхностному модифицированию // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23, № 1. С. 92-102.
26. Петроченко С.В., Федоров А.А. Технология повышения качества рабочей поверхности коллекторов машин постоянного тока при ее механической обработке // Омский научный вестник. 2014. № 1(127). С. 113-117.
11. Pyun Y., Park J.H., Suh C.M., Cho I. et al. Tribological characteristics of radial journal bearings by ultrasonic nanocrystal surface modification technology. International Journal of Modern Physics B. 2010;(24):3011-3016.
12. Qin H., Ren Z., Zhao J., Ye C et al. Effects of ultrasonic nanocrystal surface modification on the wear and micro-pitting behavior of bearing steel in boundary lubricated steel-steel contacts. Wear. 2017;(392-393):177-186.
13. Wang Y., Lin J., Wang Y.s., Fu. X. Effect of ultrasonic rolling on the surface integrity and corrosion properties of GCr15 steel before and after quenching. Materials Research Express. 2022;(9):056505.
14. Magazov N., Satbaeva Z., Rakhadilov B., Amanov A. A Study on surface hardening and wear resistance of AISI 52100 steel by ultrasonic nanocrystal surface modification and electrolytic plasma surface modification technologies. Materials. 2023;(16):6824.
15. Xue X., Xu S., Ma X., Han J., Zheng W. Surface microstructure refinement and mechanical properties of GCr15 steels improved during ultrasonic surface rolling processing. Materials Research. 2023;(26):e20220606.
16. Denisova N.E., Shorin V.A., Gontar I.N., Volchikhina N.I., Shorina N.S. *Tribotekhnicheskoye materialovedenie i tribotekhnologiya: ucheb. posobie* [Tribotechnical materials and tribotechnology: textbook]. Penza : Publishing House of Penza State University, 2006, 248 p. (In Russ.)
17. Lesyk D., Alnusirat W., Martínez S., Mordiyuk B. et al. Comparison of effects of laser, ultrasonic, and combined laser-ultrasonic hardening treatments on surface properties of AISI 1045 steel parts. Advanced Manufacturing Processes III. InterPartner 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. 2022, pp. 313-322.
18. Hu X., Qu S., Chen Z., Zhang P., Lu Z. et al. Rolling contact fatigue behaviors of 25CrNi2MoV steel combined treated by discrete laser surface hardening and ultrasonic surface rolling. Optics and Laser Technology. 2022;(155):108370.
19. Lesyk D., Martínez S., Mordiyuk B., Dzhemelinskyi V. et al. Layered hardening and grain structure refinement of low-alloyed tool steel applying two-stage surface morphology modification by laser phase transformation and ultrasonic peening. MRS Advances. 2023;(8):988-995.
20. Lesyk D., Dzhemelinskyi V., Mordiyuk B., Martínez S. et al. Surface quality improvement of steel parts by combined laser-ultrasonic treatment: determination algorithm of technological parameters. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2023;(2):17-26.
21. Lesyk D., Mordiyuk B., Alnusirat W., Martínez S. et al. Ultrasonic surface finishing of AISI 1045 steel hardened by laser heat treatment with Fibre Laser and Scanning Optics: layered-structure-induced hardening and enhanced surface morphology. Progress in Physics of Metals. 2024;(25):822-867.
22. Petrochenko S.V., Hao Q., Yu X., Zhao K. Finding Optimal Modes of Laser Hardening of GCr15 Bearing Steel. Russian Engineering Research. 2025;(45):346-353.
23. Nabatov V.V. *Metody nauchnykh issledovaniy* [Methods of scientific research]. Moscow: MISIS, 2020, 328 p. (In Russ.)
24. Fedorov A.A., Petrochenko S.V. Spectral method of inspection of parts after ultrasonic hardening treatment Part 1. *Kontrol. Diagnostika* [Control. Diagnostics]. 2014;(6): 65-72. (In Russ.)

References

1. Sapunov S.V. *Materialovedeniye* [Materials Science]. Saint Petersburg: Lan Publishing House, 2025, 208 p. (In Russ.)
2. Zemskov Yu.P. *Materialovedeniye* [Materials Science]. Saint Petersburg: Lan Publishing House, 2024, 188 p. (In Russ.)
3. Bogodukhov S.I., Kozik E.S. *Materialovedeniye* [Materials Science]. Moscow: Mashinostroenie, 2023, 504 p. (In Russ.)
4. Galimov E.R., Abdullin A.L. *Sovremennyye konstruktivnyye materialy dlya mashinostroeniya* [Modern structural materials for mechanical engineering]. Saint Petersburg: Lan Publishing House, 2025, 268 p. (In Russ.)
5. Ivanov I.A., Gubenko S.I., Kononov D.P. *Poverkhnost detalei mashin i mekhanizmov* [The surface of machine parts and mechanisms]. St. Petersburg: Lan Publishing House, 2022, 156 p. (In Russ.)
6. Ye C., Telang A., Gill A.S., Suslov S. et al. Gradient nanostructure and residual stresses induced by ultrasonic nano-crystal surface modification in 304 austenitic stainless steel for high strength and high ductility. Materials Science and Engineering: A. 2019;(613):274-288.
7. Li K., He Y., Cho I.H., Lee C.S. et al., Effect of ultrasonic nanocrystalline surface modification on the microstructural evolution of Inconel 690 alloy. Materials and Manufacturing Processes. 2015;(30):194-198.
8. Amanov A., Pyun Y.S., Sasaki S. Effects of ultrasonic nanocrystalline surface modification (UNSM) technique on the tribological behavior of sintered Cu-based alloy. Tribology International. 2014;(72):187-197.
9. Ye C., Zhou X., Telang A., Gao H. et al. Surface amorphization of NiTi alloy induced by ultrasonic nanocrystal surface modification for improved mechanical properties. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. 2016;(53):455-462.
10. Gujba A.K., Ren Z., Dong Y., Ye C. et al. Effect of ultrasonic nanocrystalline surface modification on the water droplet erosion performance of Ti-6Al-4V. Surface and Coatings Technology. 2016;(307):157-170.

25. Polonyankin D.A., Fedorov A.A., Gomonyuk T.M. The effect of static load on the structural and phase composition of 12Kh18N10T stainless steel subjected to ultrasonic nanocrystalline surface modification. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025;23(1): 92-102. (In Russ.)
26. Petrochenko S.V., Fedorov A.A. Technology for improving the quality of the working surface of DC collectors during its mechanical processing. *Omskiy nauchniy vestnik* [Omsk Scientific Bulletin]. 2014;(1(127)):113-117. (In Russ.)

Поступила 15.08.2025; принята к публикации 29.09.2025; опубликована 31.03.2026
Submitted 15/08/2025; revised 29/09/2025; published 31/03/2026

Петроченко Сергей Валерьевич – кандидат технических наук, директор по исследованиям и разработкам, ведущий научный сотрудник, ООО «Нинбоский научно-исследовательский институт интеллектуальных станков, входящий в группу Китайских национальных институтов машиностроения», Нинбо, Китай.
Email: c.o.r.d.84@mail.ru. ORCID 0000-0001-5600-835X

Федоров Алексей Аркадьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения», Омский государственный технический университет, Омск, Россия.
Email: aafedorov83@rambler.ru. ORCID 0000-0002-6681-087X

Макашин Дмитрий Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Металлорежущие станки и инструменты», Омский государственный технический университет, Омск, Россия.
Email: dima.makashin@gmail.com. ORCID 0000-0002-8297-5551

Михайленко Степан Викторович – ассистент кафедры «Металлорежущие станки и инструменты», Омский государственный технический университет, Омск, Россия.
Email: stepan_01.01@mail.ru. ORCID 0000-0002-6806-9915

Sergei V. Petrochenko – PhD (Eng.), Research and Development Director, Lead Researcher, Ningbo Intelligent Machine Tool Research Institute Co., Ltd. of China National Machinery Institute Group, Ningbo, China.
Email: c.o.r.d.84@mail.ru. ORCID 0000-0001-5600-835X

Aleksei A. Fedorov – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Omsk State Technical University, Omsk, Russia.
Email: aafedorov83@rambler.ru. ORCID 0000-0002-6681-087X

Dmitrii S. Makashin – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Metal Cutting Machines and Tools, Omsk State Technical University, Omsk, Russia.
Email: dima.makashin@gmail.com. ORCID 0000-0002-8297-5551

Stepan V. Mikhailenko – Assistant of the Department of Metal Cutting Machines and Tools, Omsk State Technical University, Omsk, Russia.
Email: stepan_01.01@mail.ru. ORCID 0000-0002-6806-9915



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 620.172.21:539.4.014.13

DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-1-88-99

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ НЕРАЗРУШАЮЩАЯ ОЦЕНКА ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ХОЛОДНОКАТАНОЙ СТАЛЬНОЙ ЛЕНТЕ

Чукин М.В., Копцева Н.В., Ефимова Ю.Ю., Шеметов А.Н.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация. Технологические процессы холодной листовой прокатки сопровождаются неравномерностью деформации стальной заготовки, что является основной причиной возникновения остаточных напряжений и может существенно повлиять на механические свойства листового или полосового проката. Остаточные напряжения могут привести к браку на финальных операциях обработки такой продукции или преждевременному выходу из строя готовых изделий. Для правильной организации технологического процесса прокатки необходимо прогнозировать распределение остаточных напряжений при различных параметрах технологии непосредственно в момент выпуска холоднокатаного листового проката, поэтому задача определения остаточных напряжений и их влияния на качество стального листа представляется актуальной. Целью работы является оценка остаточных напряжений, возникающих в процессе изготовления холоднокатаной листовой заготовки, предназначенной для холодной штамповки, с использованием метода термоэлектродвижущей силы (ТЭДС). Для экспериментального определения значений ТЭДС образцов холоднокатаной ленты из стали марки 08Ю на комплексе Gleeble 3500 использована авторская методика, положительно зарекомендовавшая себя при исследовании этим методом твердости. Доказано, что между значениями ТЭДС и остаточными напряжениями, измеренными поперек направления прокатки, возникающими при производстве холоднокатаной стальной ленты, наблюдается сильная положительная корреляция, свидетельствующая, что с увеличением остаточных напряжений ленты значения ТЭДС возрастают. При этом верно и обратное положение: чем выше значение ТЭДС, тем следует ожидать более высоких остаточных напряжений в направлении поперек прокатки. Предложена методика, состоящая в построении аппроксимирующих прямых для экспериментальных зависимостей значений ТЭДС от градиента температур, тангенс угла наклона которых представляет собой коэффициент Зеебека, что может быть использовано для оценки остаточных напряжений с построением карт их распределения по поверхности ленты. Таким образом, доказана перспективность использования метода ТЭДС для контроля остаточных напряжений холоднокатаной стальной ленты.

Ключевые слова: холоднокатаная лента, распределение остаточных напряжений по длине и ширине ленты, термоэлектрический метод исследования, термоэлектродвижущая сила, коэффициент Зеебека

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования России (проект FZRU-2025-0003).

© Чукин М.В., Копцева Н.В., Ефимова Ю.Ю., Шеметов А.Н., 2026

Для цитирования

Термоэлектрическая неразрушающая оценка остаточных напряжений в холоднокатаной стальной ленте / Чукин М.В., Копцева Н.В., Ефимова Ю.Ю., Шеметов А.Н. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №1. С. 88-99. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-88-99>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

THERMOELECTRIC NON-DESTRUCTIVE EVALUATION OF RESIDUAL STRESSES IN COLD-ROLLED STEEL STRIP

Chukin M.V., Koptseva N.V., Efimova Yu.Yu., Shemetov A.N.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Technological processes of cold sheet rolling are accompanied by uneven deformation of the steel billet, which is the main cause of residual stresses and can significantly affect the mechanical properties of sheet or strip rolled products. Unaccounted for residual stresses can lead to defects in the final processing operations of such products or premature failure of finished products. For the proper organization of the rolling process, it is necessary to predict the distribution of residual stresses at various technology parameters immediately at the time of cold-rolled products manufacture, therefore, the task of determining residual stresses and their impact on the quality of the steel sheet is relevant. The work is aimed at evaluating the residual stresses that occur during the manufacturing process of cold-rolled sheet billet intended for cold stamping using the thermoelectromotive force (TEMF) method. For the experimental determination of the TEMF values of cold-rolled strip samples made of 08Yu steel, an original method was used on the Gleeble 3500 system, which has previously proven effective in hardness studies using this method. It has been demonstrated that a strong positive correlation exists between the thermoelectromotive force (TEMF) values and residual stresses measured transverse to the rolling direction, which arise during the production of cold-rolled steel strip. This correlation indicates that as the residual stresses in the strip increase, the TEMF values also increase. The inverse relationship is also valid: higher TEMF values correspond to higher residual stresses in the transverse direction. A methodology has been proposed that involves constructing approximating lines for the experimental dependence of TEMF values on the temperature gradient. The slope of these lines represents the Seebeck coefficient, which can be used to evaluate residual stresses and to generate maps of their distribution over the strip surface. Thus, the applicability of the TEMF method for monitoring residual stresses in cold-rolled steel strip has been substantiated.

Keywords: cold-rolled strip, distribution of residual stresses along the length and width of the strip, thermoelectric research method, thermoelectromotive force, Seebeck coefficient

The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of Russia (project FZRU-2025-0003).

For citation

Chukin M.V., Koptseva N.V., Efimova Yu.Yu., Shemetov A.N. Thermoelectric Non-Destructive Evaluation of Residual Stresses in Cold-Rolled Steel Strip. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 1, pp. 88-99. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-88-99>

Введение

Одним из наиболее универсальных, высокопроизводительных и экономичных видов металлопродукции принято считать холоднокатаный листовой и полосовой прокат, который широко используется в качестве исходной заготовки для штамповки разнообразных изделий в автомобильной, судостроительной, авиационной, строительной, консервной и других отраслях промышленности [1]. При этом технологические процессы обработки металлов давлением при изготовлении холоднокатаной стали сопровождаются неравномерностью деформации (непостоянством деформации по ширине, высоте и длине деформируемых изделий), которая может существенно повлиять на механические свойства материалов [2, 3]. Неравномерность пластической деформации различных участков материала является основной причиной возникновения остаточных напряжений [4]. В результате в слоях, получивших большие обжатия, возникают сжимающие напряжения, а в слоях, получивших обжатие меньше среднего, появляются растягиваю-

щие напряжения. Наличие остаточных напряжений к тому же может вызывать формирование остаточных деформаций, что в конечном итоге приводит к геометрическим искажениям.

Фактические значения остаточных напряжений могут варьироваться в зависимости от конкретных условий обработки, марки материала, режимов технологического процесса и применяемого оборудования. Поэтому для технологов машиностроительных предприятий понимание природы остаточных напряжений и методов их контроля является критически важным для обеспечения качества и надежности выпускаемой продукции. Остаточные напряжения могут привести к браку на финальных операциях обработки или преждевременному выходу из строя готовых изделий. Следует отметить, что результаты исследований остаточных напряжений, возникающих в изделиях, изготовленных методами холодной пластической деформации, отражены во многих научных публикациях. Так, проведена оценка влияния поверхностных остаточных напряжений на техническое состояние деталей машин после их ремонта и восстановления

[5, 6]. Проанализированы экспериментальные данные об остаточных напряжениях в различных стальных профилях холодной штамповки, тонкостенных изделиях, тарельчатых пружинах и других деталях и конструкциях [7-9]. Выполнен анализ способов определения и устранения остаточных напряжений в трубных заготовках и готовых трубах [10, 11]. Определены уровни остаточных напряжений при волочении низкоуглеродистой проволоки [12, 13].

При этом необходимо учитывать, что при изготовлении изделий из листовых заготовок обработкой давлением после снятия нагрузки в их объемах появляются дополнительные остаточные напряжения, которые суммируются с уже имеющимися [14, 15]. А при обработке полуфабриката, связанной со снятием поверхностных слоев металла или вырезкой детали, может произойти деформация, вызванная нарушением баланса остаточных напряжений в заготовке. После такой обработки заготовка может не соответствовать требованиям или допускам на геометрические размеры. В ряде научных работ отмечается, что если последующая обработка листового материала связана со снятием или дополнительной обработкой поверхностного слоя металла, то можно получить потерю плоскостности листа [4, 16, 17]. Более того, финишная обработка холоднокатаных листов часто осуществляется с использованием либо растяжных машин, либо роликоправильных машин, либо дрессировки в валках большого диаметра, при этом могут быть наведены дополнительные остаточные напряжения [18], хотя целью правки часто является как раз снятие внутренних напряжений.

Однако остаточным напряжениям, формирующимся в холоднокатаном листовом материале, уделяется значительно меньше внимания, в то время как их возникновение существенным образом определяет качество листа, вызывая деформацию, коробление, растрескивание и хрупкое разрушение [19, 20]. Так, сжимающие напряжения могут вызвать местную потерю устойчивости и коробление листа, а растягивающие напряжения могут привести к разрушению листового проката из хрупких малопластичных материалов. В зонах концентрации растягивающих напряжений, особенно при циклических нагрузках, возможно образование трещин, а также может происходить ускорение коррозионных процессов. Особо существенно влияют на изменение геометрии полос остаточные напряжения, возникающие в достаточно тонких и широких металлических полосах. Неблагоприятное их распределение приводит к нарушению планшетности и, следовательно, к негодности готовой продукции.

Для того чтобы правильно организовать технологический процесс прокатки, необходимо знание распределения остаточных напряжений при различных параметрах технологии. В связи с этим возникает необходимость прогнозирования наличия остаточных напряжений непосредственно в момент выпуска холоднокатаного листового проката, поэтому задача

определения остаточных напряжений и их влияния на качество стального листа представляется актуальной.

Для определения величины и характера остаточных напряжений распространены различные разрушающие и неразрушающие методы [21, 22]. В частности, используется метод инструментального индентирования, который, однако, позволяет оценивать остаточные напряжения только в поверхностных слоях. Широко применяется ультразвуковой метод, недостаток которого связан с тем, что на скорость распространения волны влияет не только напряженно-деформированное состояние, но и другие микроструктурные характеристики, такие как размер зерен, кристаллографическая текстура и, кроме того, его точность сильно подвержена влиянию собственной температуры образца и температуры окружающей среды, влияющих на скорость ультразвуковых волн. Метод, основанный на дифракции рентгеновских лучей, позволяет получить абсолютные значения остаточных напряжений, но также имеет определенные ограничения: глубина проникновения рентгеновских лучей ограничена несколькими десятками микрон, что делает метод преимущественно поверхностным; требуется строгое соблюдение методики и наличия высококачественного оборудования; при неоднородности напряженного состояния по глубине слоя проникновения рентгеновских лучей и наличии ярко выраженной кристаллографической текстуры происходит снижение точности. Магнитные методы определения остаточных напряжений являются косвенными, поэтому практически нельзя учесть все факторы, которые влияют на исходную величину параметра контроля, особенно на образцах со структурной неоднородностью.

Несмотря на то, что остаточные напряжения относятся к числу факторов, существенно влияющих на множество характеристик, определяющих качество готовых изделий, к сожалению, в показателях качества остаточные напряжения, как правило, не отражены. Причины кроются в отсутствии оперативных методов точного замера остаточных напряжений, количественной оценке их влияния на эксплуатационные свойства. Поэтому возникает необходимость в создании новых методов и средств неразрушающего контроля, что является актуальной проблемой.

Обзор имеющихся литературных источников показал, что эффективным методом контроля влияния структурного состояния и различного рода дефектов на свойства холоднокатаной листовой стали может явиться применение термоэлектродвижущей силы (ТЭДС), которая является одним из физических свойств, в высокой степени чувствительных к упругой и пластической деформации [23-25]. Этот метод использовали, например, для исследования области максимальной деформации пластически деформированных сталей [26], оценки уровня деформации в титановых сплавах [27], зон предполагаемой локализации пластических деформаций стали [28], а также для определения преобладающих остаточных напряже-

ний в образцах с дробеструйной обработкой [29]. В ранее осуществленных исследованиях авторов данной работы [30] была выполнена оценка неоднородности распределения твердости холоднокатаной ленты с использованием метода ТЭДС. В связи с вышесказанным, целью проводимых исследований, результаты которых представлены в данной статье, является оценка остаточных напряжений, возникающих в процессе изготовления холоднокатаной листовой заготовки, предназначенной для холодной штамповки, с использованием метода ТЭДС.

Материалы и методы исследования¹

Исследование проводилось на образцах размером 30×50 мм, вырезанных из рулона холоднокатаной ленты толщиной 0,5 мм и шириной 273 мм, химический состав которой соответствовал стали марки 08Ю с содержанием 0,04% С, 0,01% Si, 0,21% Mn, 0,008% S, 0,007% P и 0,07% Al. Схема отбора образцов и их маркировка представлены на рис. 1, а².

Эксперименты по измерению ТЭДС проводились

с применением модуля PocketJaw исследовательского комплекса Gleeble 3500. В работе использовался косвенный нагрев с помощью специально сконструированных сборочных элементов (рис. 1, б), исходя из необходимости предотвращения возможного влияния на значения ТЭДС электромагнитных полей, возникающих при нагреве образцов прямым пропусканием электрического тока, реализуемого в комплексе Gleeble 3500. При этом передача тепла от нагревательного элемента к исследуемым образцам происходила по механизмам, имитирующим нагрев в печи. По центру нагревательного элемента закреплялась термопара ТС1, управляющая нагревом и охлаждением. В непосредственной близости от нагревательного элемента температуру «горячего» конца образца фиксировала термопара ТС2, а температуру вблизи «холодного» конца образца записывала термопара ТС3, расположенная на расстоянии 38±1 мм от термопары ТС2 (рис. 1, в). Значения температур и ТЭДС снимались с помощью хромель-алюмелевых термопар (тип К) с частотой 10 Гц.

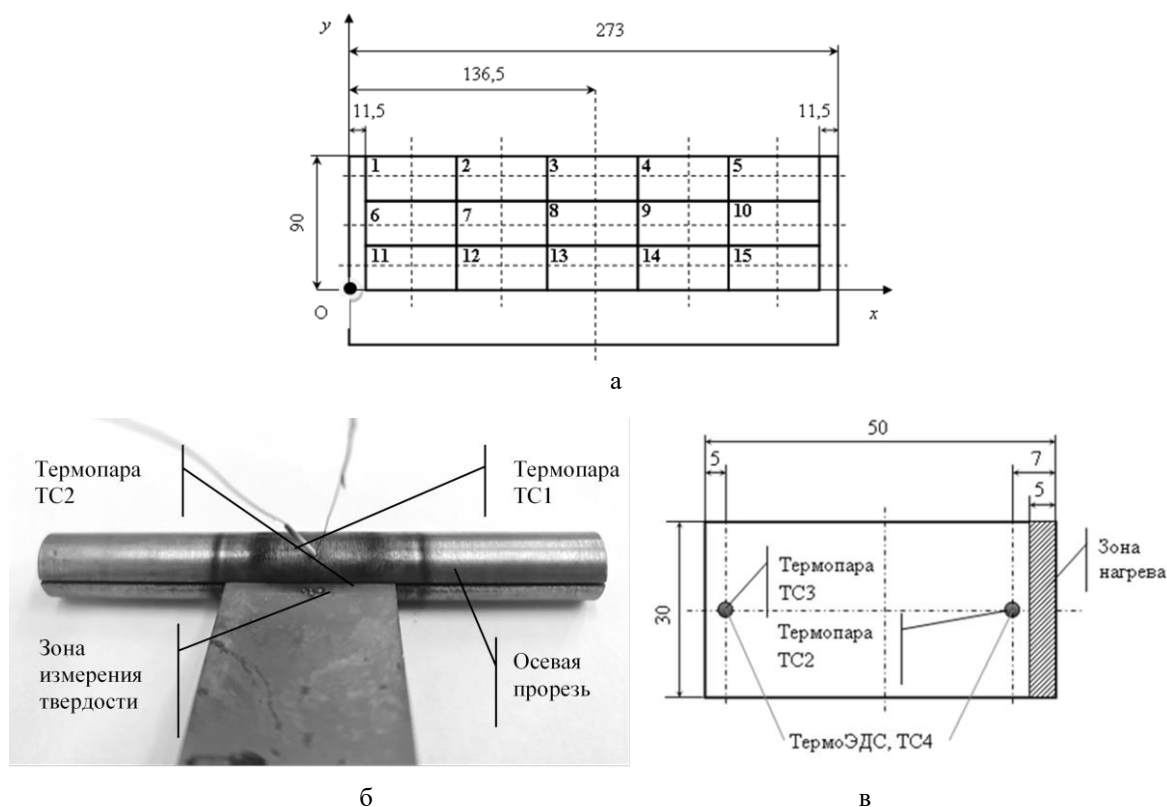


Рис. 1. Схема отбора и маркировка образцов (а), сборочного элемента для косвенного нагрева образца (б) и схема крепления термопар на образцах холоднокатаной ленты при измерении ТЭДС (в)

Fig. 1. Sampling scheme and labeling of samples (a), an assembly element for indirect heating of the sample (б) and a scheme for attaching thermocouples to samples of cold-rolled strip when measuring TEMF (в)

¹ Исследования проводились в НИИ «Наносталей» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова».

² Образцы с 1 по 5 подвергались отжигу при температуре 720°C в течение 1 ч для снятия остаточных напряжений с целью выявления величины ТЭДС стали в ненапряженном состоянии. Результаты этих исследований лежат вне рамок данной работы и приведены в предыдущих публикациях авторов.

Условия нагрева и охлаждения для всех исследуемых образцов принимались одинаковыми. Нагревательный элемент разогревался со скоростью 10 °С/с до температуры 750 °С, затем осуществлялась изотермическая выдержка в течение 10 с и охлаждение со скоростью 10 °С/с до достижения температуры 100 °С. Охлаждение нагревательного элемента осуществлялось за счет теплообмена с окружающей средой и медными охлаждаемыми зажимами. Программа проведения эксперимента задавалась при помощи программного обеспечения QuikSim2®, а обработка результатов эксперимента осуществлялась при помощи стандартного программного пакета Origin® комплекса Gleeble 3500.

Схема отбора и маркировки образцов, а также методика определения ТЭДС с использованием комплекса Gleeble 3500 более подробно описаны в работе [30].

Измерение твердости осуществлялось в центре образцов на универсальном твердомере EmcoTest M4C075G3 вдавливанием алмазной пирамиды с углом при вершине 136° при нагрузке 98,07 Н (10 кгс) в соответствии с ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007.

Определение остаточных напряжений проводилось в центре образцов в направлении поперек прокатки (то есть вдоль оси x) с использованием метода рентгеновской дифрактометрии. Известно, что растяжение или сжатие кристалла при возникновении в кристаллической решетке напряжений приводит к изменению межплоскостного расстояния d , которое может отклоняться как в сторону больших, так и меньших значений от расстояния в ненапряженном состоянии d_0 , что находит отражение в изменении брэгговского угла 2θ при дифракции рентгеновских лучей. Если измерить смещение дифракционного максимума, полученного от набора кристаллографических плоскостей с одинаковыми индексами $\{hkl\}$, то становится возможным рассчитать изменение межплоскостного расстояния по сравнению с ненапряженным состоянием, а также величину остаточных напряжений.

Для определения поверхностных напряжений σ_φ в заданном направлении, характеризующимся азимутальным углом φ на поверхности образца, применялась традиционная методика, известная как метод « $\sin^2\psi$ » [31], принципиальная схема которого приведена на **рис. 2**. Метод « $\sin^2\psi$ » заключается в регистрации дифракционных пиков для разных углов наклона ψ плоскости, в которой расположены рентгеновская трубка и детектор, и основан на экспериментальном измерении относительного изменения $\Delta d/d$ межплоскостных расстояний.

В рентгеновской дифракции для кубических решеток существует линейная связь между углом Брэгга θ и $\sin^2\psi$ [38]. По результатам эксперимента строится зависимость $\theta = f(\sin^2\psi)$, которая описывается уравнением прямой. Отсекаемый на оси ординат отрезок позволяет найти сумму главных напряжений $(\sigma_1 + \sigma_2)$, а угол наклона – значение σ_φ :

$$\sigma_\varphi = -E \operatorname{ctg} \theta_0 \operatorname{tg} \alpha / (1 + \mu), \quad (1)$$

где α – угол наклона прямой зависимости $\theta = f(\sin^2\psi)$ к оси $\sin^2\psi$. Определяемое напряжение σ_φ лежит в плоскости образца и направлено перпендикулярно оси наклона.

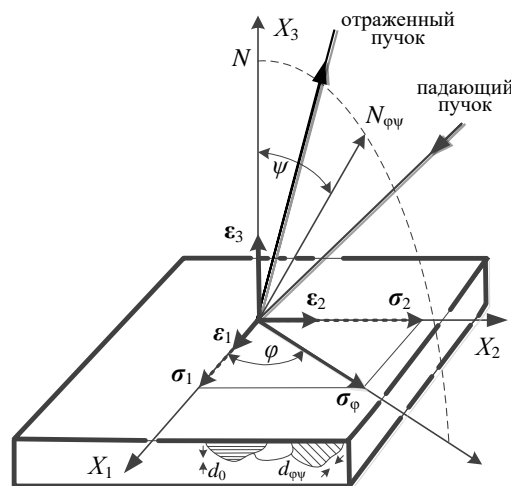
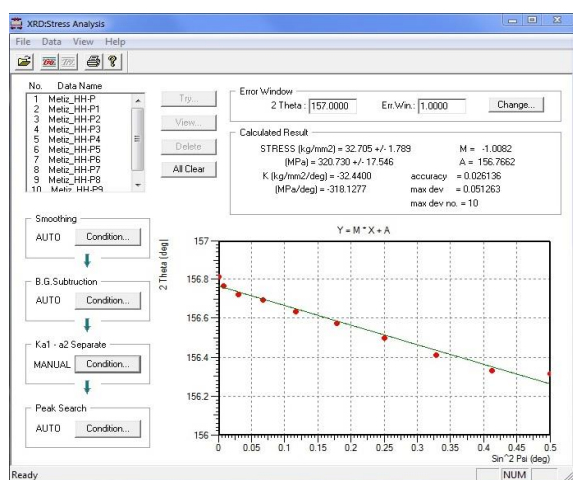


Рис. 2. Схема отражения рентгеновских лучей при съемке методом « $\sin^2\psi$ »: σ_1, σ_2 – главные напряжения ($\sigma_3 = 0$); $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ – главные деформации; ψ – угол наклона образца относительно пучка рентгеновского излучения; φ – азимутальный угол на поверхности; N и $N_{\varphi\psi}$ – нормали к отражающим плоскостям, параллельным исследуемой поверхности образца (d_0) и под углами φ и ψ к ней ($d_{\varphi\psi}$)

Fig. 2. X-ray reflection scheme during "sin²psi" imaging: σ_1, σ_2 are the main stresses ($\sigma_3 = 0$); $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ are the main deformations; ψ is the angle of inclination of the sample relative to the X-ray beam; φ is the azimuthal angle on the surface; N and $N_{\varphi\psi}$ are the normal lines to the reflecting planes parallel to the sample surface under study (d_0) and at angles φ and ψ to it ($d_{\varphi\psi}$)

В работе рентгеноструктурный анализ осуществляли с применением рентгеновского дифрактометра SHIMADZU XRD-7000 с использованием K_α -излучения хромового анода (длина волны характеристического K_α -излучения $\lambda = 2,28962 \cdot 10^{-10}$ м). Анализ напряжений осуществлялся по линии (211) α -фазы, имеющей большой угол дифракции (двойной угол дифракции $2\theta \approx 156^\circ$). Напряжение трубки составляло 30 кВ, сила тока (катод) – 40 мА, диапазон углов 2θ – от 152 до 160°. Режим съемки – непрерывный со скоростью 2°/мин. Угол ψ изменялся с помощью приставки, позволяющей менять угол в диапазоне от 0 до 50° с точностью 0,01° и составлял 0, 15, 30 и 45°.

Остаточные напряжения рассчитывались в программном пакете XRD Stress Analysis, входящем в состав программного обеспечения рентгеновского дифрактометра (**рис. 3, а**), где прописаны коэффициенты пропорциональности (K) между изменениями углов дифракции 2θ и значениями $\sin^2\psi$, используемые для расчета остаточных напряжений (**рис. 3, б**).



а

| Sample | Tube | Plane | Angle | K (kg/mm2/deg) | K (MPa/deg) |
|--------|------|-------|-------|----------------|-------------|
| a-Fe | CrKa | (211) | 156.1 | -32.44 | -318.13 |
| r-Fe | CrKb | (311) | 149.6 | -37.35 | -366.28 |
| Al | CrKa | (222) | 156.7 | -9.40 | -92.18 |
| Al | CoKa | (420) | 162.1 | -7.18 | -70.41 |
| Al | CoKa | (331) | 148.7 | -12.78 | -125.33 |
| Al | CuKa | (333) | 164.0 | -6.41 | -62.86 |
| Cu | CoKa | (400) | 163.5 | -12.04 | -118.07 |
| Cu | CuKa | (420) | 144.7 | -26.42 | -259.09 |
| WC | CoKa | (211) | 165.8 | -47.61 | -466.89 |
| WC | CuKa | (301) | 146.8 | -114.10 | -1118.94 |

б

Рис. 3. Интерфейс программы (а) и таблица коэффициентов (б) для определения остаточных напряжений
 Fig. 3. Program interface (a) and coefficient table (б) for determining residual stresses

Полученные результаты и их обсуждение

При исследовании были определены координаты центров образцов, вырезанных из холоднокатаной ленты. При расчете координат ось x была ориентирована по ширине, а ось y – по длине отрезка ленты шириной 273 мм и длиной 90 мм (см. рис. 1, а).

По кривым зависимости ТЭДС от степени температурной неоднородности $\Delta T/T_{C2}$ (пример приведен для образцов 11-15 на рис. 4) для каждого из образцов определялась величина ТЭДС при степени температурной неоднородности $\Delta T/T_{C2}=0,63$, выбор которой подробно рассмотрен в работе [30].

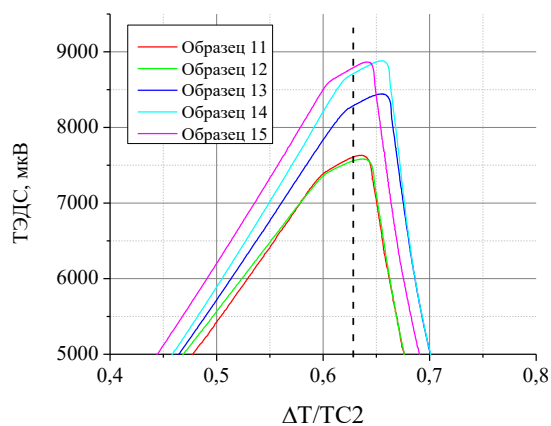


Рис. 4. Изменение ТЭДС в зависимости от степени температурной неоднородности на примере образцов 11–15

Fig. 4. Variation of TEMF values depending on the degree of temperature heterogeneity on the example of samples 11-15

Полученные результаты определения твердости, остаточных напряжений и величины ТЭДС приведены в таблице.

Таблица. Результаты экспериментов
 Table. Experiments results

| Но- мер образ- ца | Коор- дината x , мм | Коор- дината y , мм | Твер- дость, HV | ТЭДС, мкВ | Остаточные напряжения поперек прокатки, МПа | Коэф- фици- ент Зеебека, мкВ/°C |
|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------|--------------|---|---|
| 6 | 36,5 | 45 | 85 | 8172 | -32,4 | 24,11 |
| 7 | 86,5 | 45 | 91 | 8438 | 17,0 | 24,48 |
| 8 | 136,6 | 45 | 91,9 | 8725 | 33,8 | 24,48 |
| 9 | 186,5 | 45 | 94 | 8219 | -39,4 | 23,21 |
| 10 | 236,5 | 45 | 91,6 | 7808 | -77,1 | 23,32 |
| 11 | 36,5 | 15 | 89,3 | 7621 | -112,7 | 21,87 |
| 12 | 86,5 | 15 | 90,4 | 7566 | -68,4 | 21,20 |
| 13 | 136,5 | 15 | 92,4 | 8302 | -36,7 | 24,17 |
| 14 | 186,5 | 15 | 92,9 | 8726 | -98,0 | 22,36 |
| 15 | 236,5 | 15 | 91,4 | 8806 | -39,5 | 22,99 |

При исследовании были построены кривые изменений значений ТЭДС в зависимости от градиента температур, что иллюстрирует рис. 5. Их анализ показал, что для разных исследуемых образцов фиксируются различные максимальные абсолютные значения ТЭДС. Учитывая, что значения ТЭДС линейно пропорциональны градиентам температур согласно эффекту Зеебека, для каждой приведенной кривой строилась аппроксимирующая прямая с оценкой ее достоверности по критерию Пирсона и коэффициенту R-квадрат, как это показано, например, для образца 8 на рис. 6, а. Оценка статистической значимости аппроксимирующих прямых по критерию Пирсона производилась в программном комплексе Origin® по традиционной методике с применением метода наименьших квадратов для поиска параметров прямой, наиболее точно описывающей набор точек.

Пример аппроксимирующих прямых для кривых зависимостей ТЭДС от градиента температур для образцов 6-10 приведен на рис. 6, б.

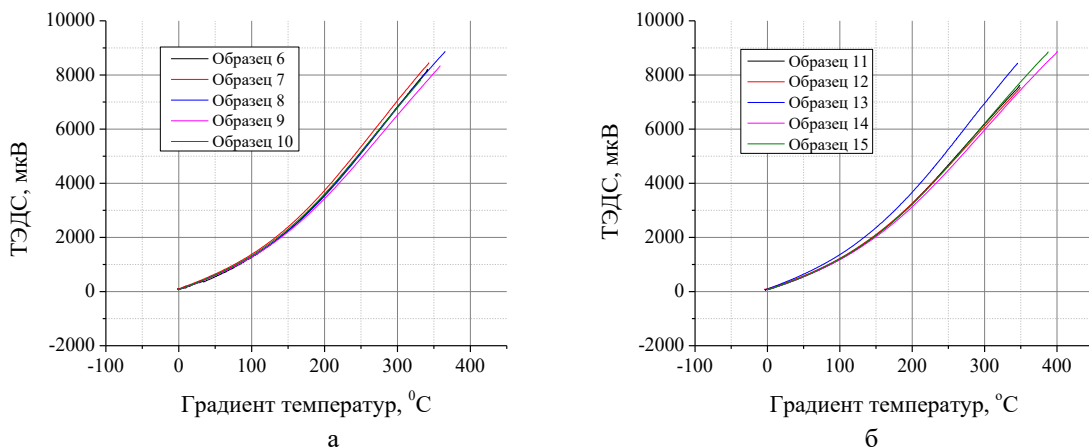


Рис. 5. Кривые изменения значений ТЭДС для образцов 6-10 (а) и 10-15 (б) в зависимости от градиента температур
 Fig. 5. Variation curves in TEMF values for samples 6-10 (a) and 10-15 (б) depending on the temperature gradient

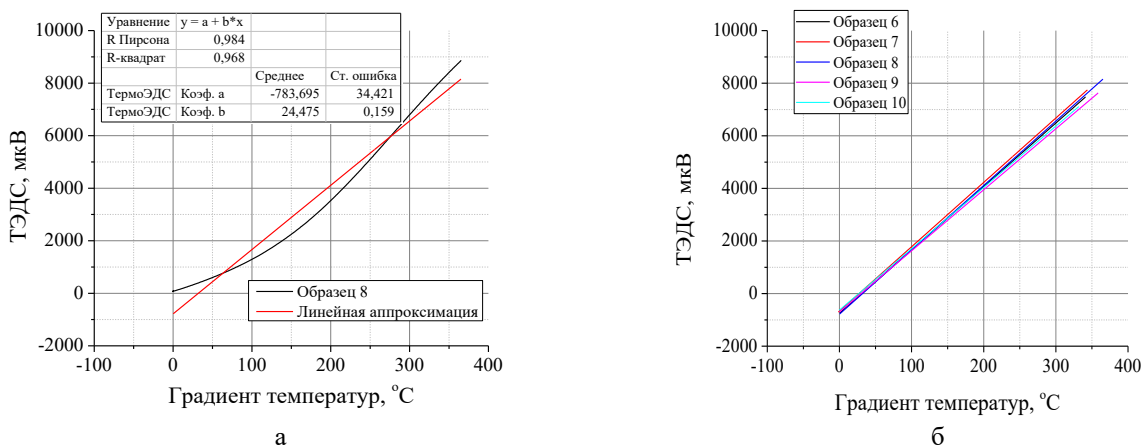


Рис. 6. Пример кривой изменения ТЭДС в зависимости от градиента температур для образца 8 с аппроксимирующей прямой (а) и группы аппроксимирующих прямых для зависимостей ТЭДС от градиента температур образцов 6-10 (б)
 Fig. 6. Example of the TEMF variation curve as a function of the temperature gradient for sample 8 with a fitted straight line (a), and a group of fitted straight lines for the dependences of TEMF on the temperature gradient for samples 6-10 (б)

Угол наклона α аппроксимирующей прямой к положительному направлению оси x однозначно определяется коэффициентом b уравнения $y = a + bx$, то есть $\alpha = \arctg b$ или $b = \tg \alpha$. С другой стороны, из геометрических соображений и известного уравнения Зеебека $\tg \alpha$ определяется соотношением

$$\tg \alpha = \frac{E}{\Delta T} = K_z, \quad (2)$$

где E – величина ТЭДС, мкВ; ΔT – градиент температуры, °С; K_z – коэффициент Зеебека, мкВ/°С.

Тогда очевидным является равенство $b = K_z$. При известных значениях коэффициентов b линейных

аппроксимирующих уравнений, а также значений градиентов температур ΔT однозначно определяется величина ТЭДС, а значение коэффициента b является коэффициентом Зеебека и характеристическим параметром исследуемого материала. Полученные экспериментально-расчетным путем значения коэффициентов Зеебека приведены в **таблице**.

Для сравнения двух параметров X (коэффициент Зеебека) и Y (величина остаточных напряжений), находящихся в разных числовых пространствах, получаемых в ходе проведения экспериментов для каждого из образцов, использовалась традиционная методика парной корреляции по Пирсону. Данная методика является статистическим методом измерения степени линейной взаимосвязи между двумя переменными, а в основе метода лежит вычисление коэф-

коэффициента корреляции ($R_{X,Y}$), который варьируется от -1 до $+1$. Значение коэффициента $R_{X,Y} = +1$ свидетельствует об идеальной положительной корреляции (когда значение одной переменной растет, значение другой также растет), $R_{X,Y} = 0$ – отсутствие линейной корреляции, $R_{X,Y} = -1$ характеризует идеальную отрицательную корреляцию (когда значение одной переменной увеличивается, значение другой уменьшается). Значение коэффициента корреляции Пирсона интерпретируется исходя из его абсолютных значений. Принято считать, что абсолютные значения $R_{X,Y} < 0,3$ свидетельствуют о слабой связи, значения $R_{X,Y}$ от $0,3$ до $0,7$ – о связи средней тесноты, а значения $R_{X,Y} > 0,7$ – о сильной связи. Расчет коэффициентов парной корреляции производился также в программном комплексе Origin®.

Величины коэффициента парной корреляции Пирсона между значениями угла наклона аппроксимиру-

ющей прямой ТЭДС и величиной остаточных напряжений, измеренных поперек направления прокатки ленты, для образцов 6-10 составили $0,87$, а для образцов 11-15 – $0,64$. Это свидетельствует о наличии сильной положительной корреляционной связи между ТЭДС и остаточными напряжениями, измеренными в направлении поперек прокатки и подтверждается характером изменения значений этих измеренных величин при переходе от одного образца к другому (рис. 7), расположенных в соседних участках по длине исследуемого отрезка ленты, а также картами распределения значений остаточных напряжений (рис. 8, а) и коэффициентов Зеебека (рис. 8, б) по координатам центров образцов на поверхности ленты. Это свидетельствует о том, что с увеличением остаточных напряжений ленты значения ТЭДС возрастают. При этом верно и обратное положение: чем выше значение ТЭДС, тем следует ожидать более высоких остаточных напряжений в направлении поперек прокатки.

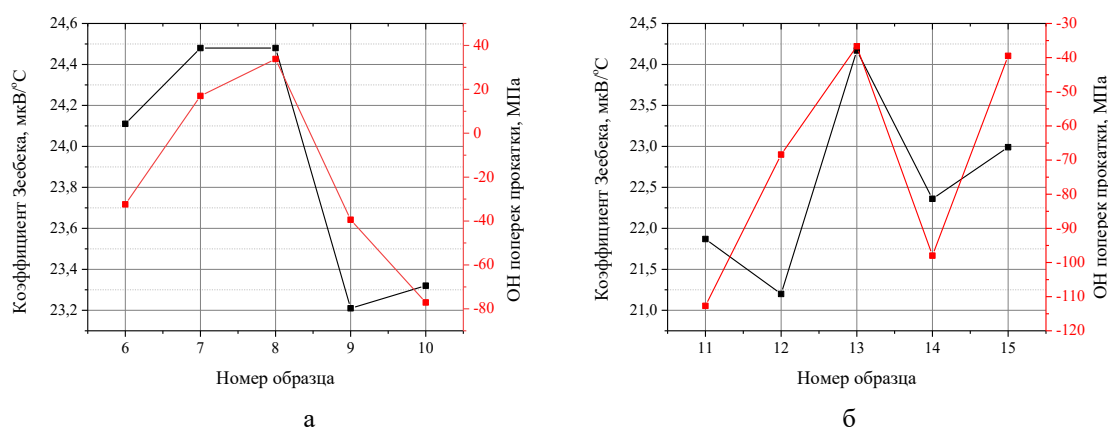


Рис. 7. Изменения величины ТЭДС и значений остаточных напряжений, измеренных в направлении поперек прокатки, при переходе от одного образца к другому в группах образцов 6-10 (а) и 11-15 (б)

Fig. 7. Changes in the TEMF values and residual stress values measured in the transverse direction to rolling, when transitioning from one sample to another in the groups of samples 6-10 (a) and 11-15 (b)

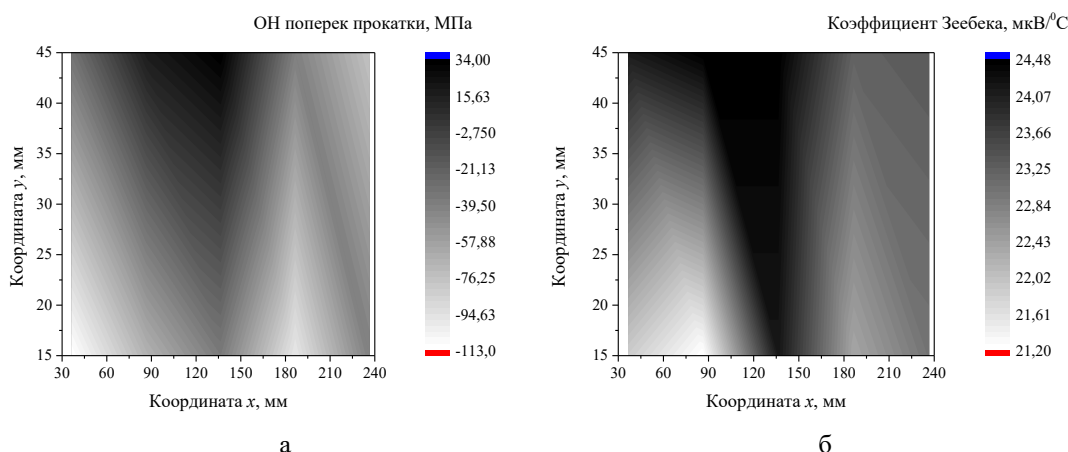


Рис. 8. Карта распределения значений остаточных напряжений, снятых поперек прокатки (а), и коэффициентов Зеебека (б) по координатам центров образцов на поверхности ленты

Fig. 8. Map of the distribution of residual stress values measured transverse to the rolling direction (a), and Seebeck coefficients (b), according to the coordinates of the sample centers on the strip surface

Заключение

Для определения ТЭДС образцов холоднокатаной ленты из стали марки 08Ю на комплексе Gleeble 3500 использована авторская методика, положительно зарекомендовавшая себя при исследовании твердости холоднокатаной ленты и отличающаяся от известных тем, что для предотвращения возможного влияния электромагнитных полей на значения ТЭДС при нагреве прямым пропусканием электрического тока применялся нагревательный элемент с осевой прорезью по всей его длине с управляющей нагревом и охлаждением термопарой, прикрепленной по центру нагревательного элемента. Передача тепла от нагревательного элемента к исследуемым образцам происходила по механизмам, моделирующим нагрев в печи.

Доказано, что между значениями ТЭДС и остаточными напряжениями, измеренными поперек направления прокатки, возникающими при производстве холоднокатаной стальной ленты, наблюдается сильная положительная корреляция, подтверждающая, что с увеличением остаточных напряжений ленты значения ТЭДС возрастают. При этом верно и обратное положение: чем выше значение ТЭДС, тем следует ожидать более высоких остаточных напряжений в направлении поперек прокатки.

Предложена методика, состоящая в построении аппроксимирующей прямой для экспериментальной зависимости значения ТЭДС от градиента температур, тангенс угла наклона которой представляет собой коэффициент Зеебека, что может быть использовано для оценки остаточных напряжений с построением карт их распределения по поверхности ленты.

Таким образом, доказана перспективность использования метода ТЭДС для контроля остаточных напряжений холоднокатаной стальной ленты.

Список источников

1. Павлов И.М. Теория прокатки. М.: Наука, 1950. 610 с.
2. Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В., Тиунов В.В. Технологические остаточные напряжения и их влияние на долговечность и надежность металлоизделий: монография. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. 226 с.
3. Методы исследования механических характеристик металлов и сплавов в процессах обработки давлением с учетом неоднородности структуры / М.П. Барышников, М.В. Чукин, А.Б. Бойко и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 4 (48). С. 26-31.
4. Through-thickness resolution, stress oscillations and residual stress in cold rolling / F. Flanagan, A. N. O'Connor, M. Erfanian et al. // European Journal of Mechanics, A/Solids. 2025, vol. 114, 105761. DOI:10.1016/j.euromechsol.2025.105761.
5. Богданов Н.В., Будюкин А.М. Влияние остаточных напряжений в металле кузова автомобиля после ДТП на его надежность // Современные технологии, применяемые при обслуживании и ремонте автомобилей: сб. тр. V Национальной межвузовской научно-

технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. Санкт-Петербург: Изд-во Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I. 2022. С. 101-105.

6. Игнатъев А.Г., Третьяков А.А. Повышение долговечности восстановленных деталей машин на основе управления остаточными напряжениями // Вестник ЮУрГУ. Серия: Машиностроение. 2018. Т. 18. №1. С. 58-67. DOI: 10.14529/engin180107.
7. Adrian D., & Crisan A. Cold Rolling Effects on Material Properties in Pallet Rack Uprights. The Open Civil Engineering Journal. 2017, no. 11, pp. 319–331. doi.org/10.2174/1874149501711010319.
8. Investigation into the distribution of residual stresses in pressed-braked thin-walled steel lipped channel sections using the 3D-FEM technique / A. Mutafia, N. Yidris, J. Loughlan et al. // Thin-Walled Structures. 2019, vol. 135, February, pp. 437-445. DOI:10.1016/j.tws.2018.11.003
9. Influence of process parameters on the residual stress state and properties in disc springs made by incremental sheet forming (ISF)/ Afzal, M.J., Hajavifard, R., Buhl, J. et al. //Forsch Ingenieurwes. 2021, vol. 85, pp. 783–793. https://doi.org/10.1007/s10010-021-00491-w
10. Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В., Хабарова Д. Релаксация остаточных напряжений и точность трубных металлоизделий // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. № 3 (16). С. 103-108.
11. Погуляев С.И., Максютин И.В., Попков А.С. Влияние неравномерности распределения остаточных и эксплуатационных напряжений в трубах на возникновение в них дефектов коррозионного растрескивания под напряжением // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». 2022. № 1 (50). С. 120-132.
12. Логинов Ю. Н., Грехов С. К. Формирование остаточных напряжений при волочении низкоуглеродистой проволоки // Сталь. 2021. № 5. С. 25-28.
13. Громов Д.В., Радионова Л.В., Глебов Л.А. Анализ остаточных напряжений в проволоке после волочения в монолитной волоке // Вестник ЮУрГУ. Серия: Металлургия. 2025. Т. 25. №3. С. 48-59. DOI: 10.14529/met250305.
14. Файрушин А.М., Маркелов Д.А., Марченко И.А. Исследование закономерностей возникновения остаточных напряжений в листовом металле после операций гибки в холодном состоянии // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2020. № 4. С. 74-84.
15. Влияние остаточных напряжений на качество изделий при холодной обработке давлением листовых заготовок / А.П. Коликов, А.В. Лютцау, Н.Л. Лисунец и др. // Известия МГТУ «МАМИ». 2011. № 2(12). С. 139-144.
16. Careful finite element simulations of cold rolling with accurate through-thickness resolution and prediction of residual stress. / F. Flanagan, A. N. O'Connor, M. Erfanian et al. // ArXiv preprint arXiv:2408.03242. 2024, pp. 1-33. https://arxiv.org/pdf/2408.03242
17. Nakhoul R., Montmitonnet P., Potier-Ferry M. Multi-scale method for modeling thin sheet buckling under residual stresses in the context of strip rolling // International Journal of Solids and Structures. 2015, vol. 66, pp. 62-76. https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2015.03.028.

18. Максимов Е.А., Шаталов Р.Л., Шаламов В.Г. Разработка методики расчета остаточных напряжений и параметров пружинения листа на роликовой правильной машине // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 1. С. 14-20. DOI: 10.17073/0368-0797-2021-1-14-20.
19. Research on Distribution of Residual Stresses of Cold Rolled Sheet Distorted Area Based on ANSYS / Sun W., Shao J., He A. et al. // Manufacturing technology – abstracts. 2015, April, vol. 15, no. 2, pp. 220-226. DOI: 10.21062/ijep/x.2015/a/1213-2489/MT/15/2/220.
20. Третьяков Е.М. Остаточные напряжения в холоднодеформированных тонких изделиях и в тонколистовом дроссированном металле // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2008. № 1. С. 49-61.
21. Разрушающие методы определения остаточных напряжений (обзор) / А.Д. Монахов, Н.О. Яковлев, В.В. Автаев и др. // Труды ВИАМ. 2021. №9 (103). С. 95-104. DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-95-104.
22. Пичугин С.С., Шитиков В.С., Головков А.Н. Неразрушающие методы оценки остаточных напряжений // Труды ВИАМ. 2024. №1 (131). С.101-112. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-101-112.
23. Орлов Д. В. Термоэлектрические эффекты в металлах. Екатеринбург: УрФУ, 2005. 150 с.
24. Солдатов А.И., Солдатов А.А., Костина М.А. Современные тренды применения термоэлектрического метода в неразрушающем контроле (обзор) // Дефектоскопия. 2024. № 2. С. 64-83.
25. Нестерович Ю.И. Разработка метода и средства термоэлектрического контроля металлов и сплавов: дис. ... канд. техн. наук. Орел, 2000. 281 с.
26. Анализ возможностей термоэлектрического метода неразрушающего контроля / М.В. Тимофеев, А.Ю. Тараринов, Р.Н. Фомевко и др. // Справочник. Инженерный журнал. 2008. № 8 (137). С. 25-30
27. Carreon H., Medina A. Nondestructive characterization of the level of plastic deformation by thermoelectric power measurements in cold-rolled Ti-6Al-4V samples // Materials Science, Nondestructive Testing and Evaluation. 2007, vol. 22, no. 4, pp. 299-311. DOI: 10.1080/10589750701546960.
28. Nondestructive proximate testing of plastic deformations by differential thermal EMF measurements / A.A. Soldatov, A.I. Seleznev, I.I. Fiks et al. // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2012, vol. 48, is. 3, pp. 184-186. DOI: 10.1134/S1061830912030060.
29. Thermoelectric Nondestructive Evaluation of Residual Stress in Shot-Peened Metals / H. Carreon, P.B. Nagy, M.P. Blodgett // Research in Nondestructive Evaluation. 2002, vol. 14, is. 2, pp. 59. DOI: 10.1080/09349840209409705
30. Чукин М.В., Ефимова Ю.Ю., Копцева Н.В. Определение неоднородности свойств холоднокатаной ленты по термоЭДС. Сообщение 1. Разработка методики исследования // Черные металлы. 2026. Февраль. С. 60-66.
31. Применение рентгеновского метода для определения напряженного состояния деталей железнодорожного транспорта / С.А. Никулин, С.Л. Шиткин, А.Б. Рожнов и др. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 3. С. 200-206. DOI:10.17073/0368-0797-2017-3-200-206

References

1. Pavlov I.M. *Teoriya prokatki* [Theory of rolling]. Moscow: Nauka, 1950, 610 p. (In Russ.)
2. Kolmogorov G.L., Kuznetsova E.V., Tiunov V.V. *Tekhnologicheskie ostatochnye napryazheniya i ikh vliyaniye na dolgovechnost i nadezhnost metalloizdeliy: monografiya* [Technological residual stresses and their impact on the durability and reliability of metal products: monograph]. Perm: Perm National Research Polytechnic University Publishing house, 2012, 226 p. (In Russ.)
3. Baryshnikov M.P., Chukin M.V., Boiko A.B. et al Methods for studying the mechanical characteristics of metals and alloys in pressure treatment processes, taking into account the heterogeneity of the structure. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2014;(4(48)):26-31. (In Russ.)
4. Flanagan F., O'Connor A.N., Erfanian M. et al. Through-thickness resolution, stress oscillations and residual stress in cold rolling. *European Journal of Mechanics, A/Solids*. 2025;114:105761. doi:10.1016/j.euromechsol.2025.105761.
5. Bogdanov N.V., Budyukin A.M. The effect of residual stresses in the metal of the car body after an accident on its reliability. *Sovremennye tekhnologii, primenyaemye pri obsluzhivanii i remonte avtomobiley: sb. trudov V Natsionalnoy mezhvuzovskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, magistrantov, aspirantov i molodykh uchennykh* [Modern technologies used in car maintenance and repair. Collection of works of V National Interuniversity Scientific and Technical Conference of Students, Undergraduates, Postgraduates and Young Scientists]. Saint Petersburg: Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University Publishing House, 2022, pp. 101-105. (In Russ.)
6. Ignatiev A.G., Tretyakov A.A. Improving the durability of refurbished machine parts based on residual stress management. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Mashinostroenie* [Bulletin of South Ural State University. Series: Mechanical Engineering]. 2018;18(1):58-67. (In Russ.) doi: 10.14529/engin180107.
7. Adrian D., Crisan A. Cold Rolling Effects on Material Properties in Pallet Rack Uprights. *The Open Civil Engineering Journal*. 2017;11:319-331. doi.org/10.2174/1874149501711010319.
8. Mutafia A., Yidris N., Loughlan J. et al. Investigation into the distribution of residual stresses in pressed-braked thin-walled steel lipped channel sections using the 3D-FEM technique. *Thin-Walled Structures*. 2019;135:437-445. DOI:10.1016/j.tws.2018.11.003
9. Afzal M.J., Hajavifard R., Buhl J. et al. Influence of process parameters on the residual stress state and properties in disc springs made by incremental sheet forming (ISF). *Forsch Ingenieurwes*. 2021;85:783-793. https://doi.org/10.1007/s10010-021-00491-w
10. Kolmogorov G.L., Kuznetsova E.V., Khabarova D. Relaxation of residual stresses and precision of pipe metal products. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018;(3(16)):103-108. (In Russ.)

11. Pogulyaev S.I., Maksyutin I.V., Popkov A.S. The effect of uneven distribution of residual and operational stresses in pipes on the occurrence of stress corrosion cracking defects in them. *Nauchno-tekhnicheskiiy sbornik Vesti gazovoy nauki* [Scientific and technical collection "News of gas science"]. 2022;(1(50)):120-132. (In Russ.)
12. Loginov Yu.N., Grekhov S.K. The formation of residual stresses during low carbon wire drawing. *Stal* [Steel]. 2021;(5):25-28. (In Russ.)
13. Gromov D.V., Radionova L.V., Glebov L.A. Analysis of residual stresses in wire after drawing in monolithic fiber. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Metallurgiya* [Bulletin of South Ural State University. Series: Metallurgy]. 2025;25(3):48-59. (In Russ.) doi: 10.14529/met250305.
14. Fairushin A.M., Markelov D.A., Marchenko I.A. Investigation of patterns of residual stresses in sheet metal after cold bending operations. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal Neftgazovoe delo* [Electronic scientific Journal "Oil and gas business"]. 2020;(4):74-84. (In Russ.)
15. Kolikov A.P., Lyutsau A.V., Lisunets N.L. et al. The effect of residual stresses on the quality of products during cold pressure treatment of sheet workpieces. *Izvestiya MGTU «MAMI»* [News of MSTU MAMI]. 2011;(2(12)):139-144. (In Russ.)
16. Flanagan F., O'Connor A.N., Erfanian M. et al. Careful finite element simulations of cold rolling with accurate through-thickness resolution and prediction of residual stress. ArXiv preprint arXiv: 2408.03242. 2024;1-33. <https://arxiv.org/pdf/2408.03242>
17. Nakhoul R., Montmitonnet P., Potier-Ferry M. Multi-scale method for modeling thin sheet buckling under residual stresses in the context of strip rolling. *International Journal of Solids and Structures*. 2015;66:62-76. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2015.03.028>.
18. Maksimov E.A., Shatalov R.L., Shalamov V.G. Development of a methodology for calculating residual stresses and spring parameters of a sheet on a regular roller machine. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [News of universities. Ferrous metallurgy]. 2021;64(1):14-20. DOI: 10.17073/0368-0797-2021-1-14-20. (In Russ.)
19. Sun W., Shao J., He A. et al. Research on Distribution of Residual Stresses of Cold Rolled Sheet Distorted Area Based on ANSYS. *Manufacturing technology – abstracts*. 2015;15(2):220-226. DOI: 10.21062/ujep/x.2015/a/1213-2489/MT/15/2/220.
20. Tretyakov E.M. Residual stresses in cold-formed thin products and in thin-sheet trained metal. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Problems of mechanical engineering and machine reliability]. 2008;(1):49-61. (In Russ.)
21. Monakhov A.D., Yakovlev N.O., Avtaev V.V. et al. Destructive methods for determining residual stresses (review). *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM]. 2021;(9 (103)):95-104. (In Russ.) DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-95-104.
22. Pichugin S.S., Shitikov V.S., Golovkov A.N. Non-destructive methods of residual stress assessment. *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM]. 2024;(1(131)):101-112. (In Russ.) DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-101-112.
23. Orlov D.V. *Termoelektricheskie effekty v metallakh* [Thermoelectric effects in metals]. Yekaterinburg: UrFU, 2005, 150 p. (In Russ.)
24. Soldatov A.I., Soldatov A.A., Kostina M.A. Modern trends in the application of the thermoelectric method in non-destructive testing (review). *Defektoskopiya* [Flaw detection]. 2024;(2):64-83. (In Russ.)
25. Nesterovich Yu.I. *Razrabotka metoda i sredstva termoelektricheskogo kontrolya metallov i splavov: dis. ...kand. tekhn. nauk.* [Development of a method and means of thermoelectric control of metals and alloys. Ph.D. dissertation]. Orel, 2000, 281 p. (In Russ.)
26. Timofeev M.V., Tatarinov A.Y., Fomevko R.N. et al. Analysis of the possibilities of the thermoelectric method of non-destructive testing. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal* [Reference book. Engineering magazine]. 2008;(8(137)):25-30 (In Russ.)
27. Carreon H., Medina A. Nondestructive characterization of the level of plastic deformation by thermoelectric power measurements in cold-rolled Ti-6Al-4V samples. *Materials Science, Nondestructive Testing and Evaluation*. 2007;22(4):299-311. DOI: 10.1080/10589750701546960.
28. Soldatov A.A., Seleznev A.I., Fiks I.I. et al. Nondestructive proximate testing of plastic deformations by differential thermal EMF measurements. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2012;48(3):184-186. DOI: 10.1134/S1061830912030060.
29. Carreon H., Nagy P.B., Blodgett M.P. Thermoelectric Nondestructive Evaluation of Residual Stress in Shot-Peened Metals. *Research in Nondestructive Evaluation*. 2002;14(2):59. DOI: 10.1080/09349840209409705
30. Chukin M.V., Efimova Yu.Y., Koptseva N.V. Determination of the heterogeneity of the properties of a cold-rolled strip by TEMF. Message 1. Development of research methodology. *Chernye metally* [Ferrous metals]. 2026;60-66. (In Russ.)
31. Nikulin S.A., Shitkin S.L., Rozhnov A.B. et al. Application of the X-ray method for determining the stress state of railway transport parts. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya* [News of universities. Ferrous metallurgy]. 2017;60(3):200-206. (In Russ.) DOI:10.17073/0368-0797-2017-3-200-206.

Поступила 27.02.2026; принята к публикации 12.03.2026; опубликована 31.03.2026
Submitted 27/02/2026; revised 12/03/2026; published 31/03/2026

Чукин Михаил Витальевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: m.chukin@mail.ru. ORCID 0000-0003-0331-8105

Копцева Наталья Васильевна – доктор технических наук, профессор,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: kopceva1948@mail.ru. ORCID 0000-0002-9749-0231

Ефимова Юлия Юрьевна – кандидат технических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: jefimova78@mail.ru ORCID 0000-0002-2729-8156

Шеметов Андрей Николаевич – кандидат технических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: a.shemetov_magtu@mail.ru ORCID 0000-0001-7184-2190

Mikhail V. Chukin – DrSc (Eng.), Chief Researcher,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: m.chukin@mail.ru. ORCID 0000-0003-0331-8105

Natalia V. Koptseva – DrSc (Eng.), Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: kopceva1948@mail.ru. ORCID 0000-0002-9749-0231

Yuliya Yu. Efimova – PhD (Eng.), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: jefimova78@mail.ru ORCID 0000-0002-2729-8156

Andrey N. Shemetov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: a.shemetov_magtu@mail.ru ORCID 0000-0001-7184-2190

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ. СТАНДАРТИЗАЦИЯ. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

PRODUCT QUALITY MANAGEMENT. STANDARDIZATION. INDUSTRIAL MANAGEMENT

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 620.179.16
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-1-100-107



РАЗРАБОТКА ПОДХОДА К ВЫБОРУ СИСТЕМЫ КРИТЕРИЕВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ОБЪЕКТИВНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛОПРОДУКЦИИ

Маркевич А.В.

ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», Магнитогорск, Россия

Аннотация. Актуальность работы. Необходимость повышения эффективности и объективности процесса ультразвукового контроля металлопродукции, особенно для случаев дальнейшего производства опасных производственных объектов. Существующие требования и критерии отбраковки к проведению ультразвукового контроля могут привести к субъективности суждений специалиста, принимающего решения о годности металлопродукции, что может приводить либо к пропуску дефектов, либо к неоправданной перебраковке продукции, что резко снижает экономическую эффективность. **Цель исследования.** Разработка научно обоснованного подхода для формирования эффективного и минимально достаточного набора параметров отбраковки при ультразвуковом контроле металлопродукции, обеспечивающего баланс между его строгостью и экономической целесообразностью. **Используемые методы.** В работе применяется построение математической модели, описывающей динамику взаимодействия «потребитель-производитель» и устанавливающей общий уровень строгости контроля на основе анализа стандартов и природы дефектов. Методы анализа иерархий и преобразования матриц используются для трансформации субъективных экспертных оценок в объективную, количественно обоснованную систему взвешивания значимости отдельных критериев ультразвукового контроля. **Новизна.** Разработка и применение комплексного двухэтапного метода, который интегрирует математическое моделирование для обоснования необходимости строгого контроля и объективную оценку критериев с использованием методов преобразования матриц и анализа иерархий. Этот подход позволяет существенно минимизировать субъективные факторы, обеспечивая высокую степень надежности полученных результатов. **Результат.** Создание методики, позволяющей лицу, принимающему решение о годности металлопродукции, перейти от интуитивного назначения параметров отбраковки к количественно обоснованной системе. Данная методика обеспечивает формирование результирующего набора ранжированных критериев, гарантирующего максимальную эффективность контроля при одновременном исключении избыточных параметров. **Практическая значимость.** Внедрение предложенного подхода позволит существенно повысить надежность, объективность и экономическую эффективность операций ультразвукового контроля металлопродукции. Разработанный метод открывает направления для дальнейшего развития, включая его адаптацию к другим видам неразрушающего контроля и создание автоматизированных систем поддержки принятия решений для специалистов в области дефектоскопии.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, математическая модель, S-образная кривая, метод анализа иерархий, преобразование матриц, критерии отбраковки, внутренние несплошности, стандарты контроля

© Маркевич А.В., 2026

Для цитирования

Маркевич А.В. Разработка подхода к выбору системы критериев для оценки объективности ультразвукового контроля металлопродукции // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №1. С. 100-107. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-100-107>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

DEVELOPMENT OF THE APPROACH TO THE SELECTION OF CRITERIA SYSTEM TO ASSESS THE OBJECTIVITY OF METAL PRODUCT ULTRASONIC TESTING

Markevich A.V.

PJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The relevance of the work is due to the need to increase the efficiency and objectivity of the ultrasonic testing process of metal products, especially in cases of further manufacturing of hazardous industrial facilities. The existing requirements and rejection criteria for ultrasonic testing can lead to the judgments subjectivity of the specialist who makes decisions about the suitability of metal products, which can cause either the omission of defects or unjustified product rejection, which dramatically reduces economic efficiency. **Objectives.** The study is aimed at developing a scientifically based approach for the formation of an effective and minimally sufficient set of rejection parameters in ultrasonic testing of metal products, ensuring a balance between its rigor and economic feasibility. **Methods Applied.** The paper involves the construction of a mathematical model describing the dynamics of consumer-manufacturer interaction and establishing a general level of control rigor based on an analysis of standards and the nature of defects. Hierarchy analysis and matrix transformation methods are used to transform subjective expert assessments into an objective, quantitatively substantiated system for weighing the significance of individual ultrasonic testing criteria. **Originality.** The paper describes the development and application of a comprehensive two-stage method that integrates mathematical modeling to justify the need for strict control and objective evaluation of criteria using matrix transformation and hierarchy analysis methods. This approach makes it possible to significantly minimize subjective factors, ensuring a high degree of reliability of the results obtained. **Result.** A methodology that allows a person making the decision on the suitability of metal products to move from an intuitive assignment of rejection parameters to a quantitatively justified system has been created. This method provides the formation of a resulting set of ranked criteria that guarantees maximum control efficiency while simultaneously eliminating redundant parameters. **Practical Relevance.** The implementation of the proposed approach will significantly improve the reliability, objectivity and economic efficiency of ultrasonic testing of metal products. The developed method opens up areas for further development, including its adaptation to other types of non-destructive testing and the creation of automated decision support systems for flaw detection specialists.

Keywords: ultrasonic control, mathematical model, S-curve, hierarchy analysis method, matrix transformation, rejection criteria, internal discontinuities, standards of control

For citation

Markevich A.V. Development of the Approach to the Selection of Criteria System to Assess the Objectivity of Metal Product Ultrasonic Testing. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 1, pp. 100-107. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-100-107>

Введение

Для повышения надежности опасных производственных объектов и увеличения срока службы технологического оборудования необходимо обеспечить высокое качество металлопродукции. Конкуренентоспособность металлургических предприятий, особенно в условиях санкций и импортозамещения, напрямую зависит от качества выпускаемой продукции. Это требует внедрения, использования и совершенствования технологий и методов контроля качества [1].

Ультразвуковой контроль (УЗК) является основным методом обеспечения качества металлопродукции, используемой для производства опасных объектов. Эффективность УЗК определяется двумя ключевыми факторами: соответствием стандартам (ГОСТ, ISO, ASTM) и корректной интерпретацией результатов оператором с учетом возможных дефектов. В современной практике могут использоваться или очень

строгие, или не всегда эффективные нормативы, которые могут привести как к пропуску опасных дефектов, так и к необоснованной отсортировке качественных изделий [2-5].

С развитием технологий Индустрии 4.0 автоматизация и цифровизация производственных процессов становятся все более актуальными. Современные методы контроля значительно повышают точность диагностики и интегрируют информацию о дефектах в комплексную систему управления производством. Это открывает новые возможности для совершенствования производственных процессов, что способствует повышению их эффективности и устойчивости [6, 7].

Еще в 1970-х годах был разработан методологический аппарат для оценки достоверности результатов неразрушающих методов контроля, который позволяет проводить сравнительный анализ с эталонными, чаще всего разрушающими, методами. Данный

инструментарий способствует более точной классификации дефектов на категории «годные» и «негодные», что, в свою очередь, минимизирует вероятность как перебраковки, так и недобраковки. Анализ показателей достоверности позволяет выявить экономическую целесообразность применения многократного контроля с использованием одного метода, а также определить перспективы повышения точности выявления дефектов посредством интеграции нескольких методов неразрушающего контроля [8-10].

Принятие решений и выбор альтернатив – это одна из самых распространенных задач, с которыми сталкивается человек в любой профессиональной сфере, неразрушающий контроль не исключение. Независимо от области, на того, кто принимает решение, ложится значительная ответственность за обоснованность и рациональность этого выбора, даже в условиях неполной или неопределенной информации. Создание моделей, имитирующих человеческие рассуждения, в настоящее время является одной из ключевых задач современной науки [11].

Целью данного исследования является разработка подхода, позволяющего комплексно решить задачу формирования эффективного и минимально достаточного набора критериев отбраковки при проведении ультразвукового контроля металлопродукции.

Материалы и методы исследования

Взаимодействие между производителем и потребителем в части приемки продукции по результатам УЗК носит нелинейный характер. Производитель заинтересован в минимизации брака, потребитель – в максимизации надежности. Компромисс достигается на основе требований стандартов, но их применение зависит от уровня «строгости» и ожидания сторон.

После анализа существующих стандартов на ультразвуковой контроль определили, что некоторые из наиболее распространенных критериев отбраковки следующие: размер дефекта – определяет максимально допустимый размер дефекта, который может быть обнаружен при неразрушающем контроле; форма и тип дефекта – описывает форму и классифицирует дефекты по их типу, которая считается неприемлемой (плоскостные дефекты, такие как трещина считаются недопустимым дефектом в отличие от объемных дефектов, которые могут быть допустимыми); расположение дефекта – указывает на расположение дефекта, которое считается опасным или нежелательным. Например, несплошность, расположенная в кромочных зонах, может быть более критичной, чем дефект в центральной части изделия; количество дефектов – устанавливает максимальное количество дефектов, которые могут присутствовать в изделии.

Также необходимо учитывать специфические требования заказчика. Для некоторых проектов могут существовать дополнительные требования к качеству продукции, которые также должны учитываться.

За основу берется классическая S-образная (логистическая) кривая, которая описывает процессы насыщения. В нашем случае по оси X откладывается уровень строгости и ожидание от контроля (максимально допустимая условная площадь несплошности). По оси Y откладывается вероятный риск для потребителя и производителя.

Потребитель: кривая начинается с низкой вероятности риска при низком значении максимально допустимой условной площади несплошности и возрастает при достижении высоких уровней максимально допустимых условных площадей несплошности, демонстрируя S-образную форму.

Математически кривую можно описать логистическим уравнением:

$$R = \frac{100}{1 + e^{-k(x-x_0)}}, \quad (1)$$

где R – вероятность риска для потребителя или производителя; x – текущий уровень строгости контроля (максимально допустимая условная площадь несплошности); x_0 – уровень строгости, при котором вероятность риска равна 50% (точка перегиба). Этот параметр критически зависит от типа продукции и рисков, связанных с внутренними несплошностями; k – коэффициент, определяющий крутизну кривой, он характеризует «гибкость» стороны. Высокий k означает резкий переход от браковки к приемке (жесткая позиция), низкий k – более плавный, компромиссный подход.

После нескольких итераций оптимальными параметрами являются: $k = 0,002$ (параметр крутизны), $x_0 = 2000$ (точка перегиба).

Эта функция хорошо описывает процесс с медленным начальным ростом, быстрым ростом в средней части и замедлением при приближении к максимальному значению (рис. 1).

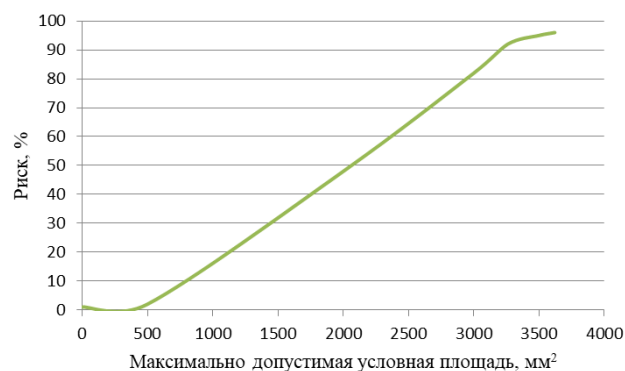


Рис. 1. Распределение рисков для потребителя
Fig. 1. Distribution of risks for the customer

Производитель: кривая начинается с высокой вероятности риска даже при низкой строгости и плавно снижается по мере увеличения максимально допустимой условной площади несплошности, демонстрируя медленный спад вначале, затем резкий переход и снова возрастание.

Модель распределения риска производителя будет хорошо описывать полиномиальная функция второй степени, так как при низких значениях максимально допустимой условной площади есть вероятность перебраковки, и риски у производителя достаточно большие. Затем при увеличении значений максимально допустимой условной площади риски возрастают, появляется вероятность недобраковки (рис. 2).

$$R \approx 0,000011x^2 - 0,032x + 100,2. \quad (2)$$

Для данной модели коэффициент детерминации составляет 0,91, коэффициент корреляции – 0,95.

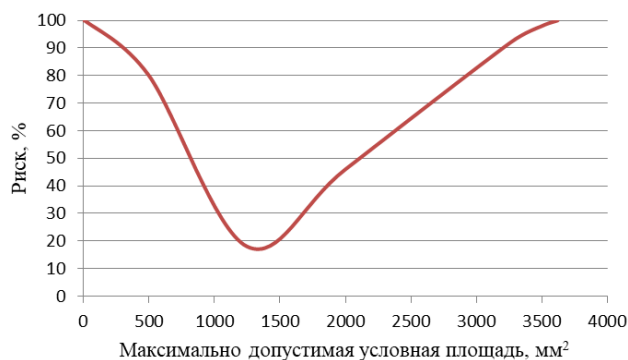


Рис. 2. Распределение рисков для производителя
Fig. 2. Distribution of risks for the manufacturer

Объединив две модели в один график (рис. 3), видна зависимость между риском производителя и потребителя. Ужесточение контроля и снижение рисков потребителя ведет к росту риска у производителя при низких значениях максимально допустимой условной площади несплошностей. Это ставит большой вопрос в экономической целесообразности выполнять такие заказы. Становится видно, в каких пределах значений несплошностей следует искать компромисс, где оба риска находятся на приемлемом для сторон уровне.

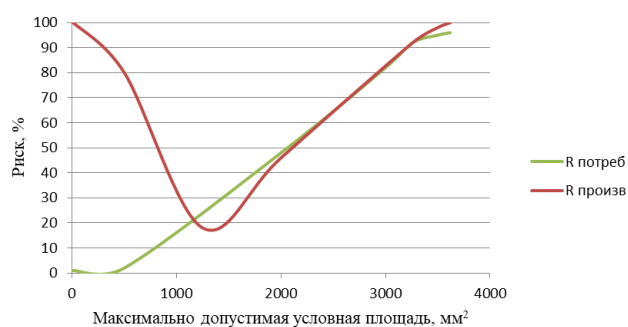


Рис. 3. Распределение рисков для потребителя и производителя
Fig. 3. Distribution of risks for the customer and the manufacturer

Результаты исследования и их обсуждение

Для анализа критериев отбраковки при проведении ультразвукового контроля по существующим

стандартам и определения их важности применили следующие методы: преобразования матриц, анализа иерархий.

Применение метода преобразования матриц. Данный метод использовали для определения значимости критерия и выбора необходимого количества критериев для обеспечения надежности результатов неразрушающего контроля. Он позволяет систематизировать информацию о критериях и их важности, а также помогает выявить наиболее значимые критерии для обеспечения надёжности результатов неразрушающего контроля.

Первоначально были определены все возможные критерии, которые могут быть использованы для оценки надёжности результатов неразрушающего контроля. Это могут быть такие критерии, как размер дефекта, форма дефекта, расположение дефекта, количество дефектов, тип дефекта и т. д.

$C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ – множество всех возможных критериев, где n – общее количество критериев.

Затем оценили важность каждого критерия. Для этого можно использовать шкалу от 1 до 10, где 1 означает наименьшую важность, а 10 – наибольшую важность. После этого составили матрицу, в которой каждый столбец будет представлять один критерий, а каждая строка – оценку важности этого критерия (табл. 1).

Для каждого критерия c_i ($i = 1, 2, \dots, n$) оценивается его важность / весовой коэффициент (w_i по шкале от 1 до 10, результаты формируют матрицу важности W), $W = [w_1, w_2, \dots, w_n]$.

Таблица 1. Оценка важности критериев
Table 1. Assessment of the criteria significance

| № п/п | Критерий | Оценка важности |
|-------|---|-----------------|
| 1 | Минимальная учитываемая условная площадь несплошностей | 10 |
| 2 | Максимальная допустимая условная площадь несплошностей | 10 |
| 3 | Условная площадь максимально допустимой зоны несплошностей | 9 |
| 4 | Относительная условная площадь (%), определяемая долей площади с несплошностями всех видов на квадратном участке площадью 1 м ² , или долей площади, занимаемой несплошностями на всей площади единицы продукции | 8 |
| 5 | Максимально допустимая условная протяжённость несплошностей | 7 |
| 6 | Минимально учитываемый эквивалентный размер несплошности | 7 |
| 7 | Максимально допустимый эквивалентный размер несплошности | 9 |
| 8 | Число непротяжённых несплошностей с эквивалентным размером | 6 |
| 9 | Минимальное расстояние между условными границами несплошностей | 7 |
| 10 | Число несплошностей на всей площади листового проката | 9 |

Далее преобразовали матрицу так, чтобы она отражала относительную значимость каждого критерия. Для этого нужно умножить каждую ячейку матрицы на её оценку важности и сложить все значения в каждой строке. Затем нужно разделить каждое значение в строке на сумму значений в этой строке, чтобы получить относительную значимость каждого критерия.

Нормализация важности критериев: для получения относительной значимости каждого критерия s_i необходимо нормализовать значения w_i :

$$s_i = \frac{w_i}{\sum_{j=1}^n w_j}, \quad (3)$$

где $\sum_{j=1}^n w_j$ – сумма всех оценок важности.

Формирование матрицы относительной значимости S : $S = [s_1, s_2, \dots, s_n]$.

После преобразования матрицы (табл. 2) выбрали количество критериев, которые будут использоваться для оценки надёжности результатов неразрушающего контроля.

Таблица 2. Преобразованная матрица
Table 2. Transformed matrix

| Критерий | Тело | | | Кромка | | |
|----------|---------------------|------------------|--------------------------|---------------------|------------------|--------------------------|
| | Весовой коэффициент | Общая значимость | Относительная значимость | Весовой коэффициент | Общая значимость | Относительная значимость |
| C_1 | 3 | 30 | 0,3 | 3 | 30 | 0,3 |
| C_2 | 3 | 30 | 0,3 | 3 | 30 | 0,3 |
| C_3 | 1 | 7 | 0,07 | 1 | 7 | 0,07 |
| C_4 | 1 | 7 | 0,07 | 1 | 7 | 0,07 |
| C_5 | 1 | 7 | 0,07 | 3 | 30 | 0,3 |
| C_6 | 1 | 7 | 0,07 | 1 | 7 | 0,07 |
| C_7 | 1 | 7 | 0,07 | 1 | 7 | 0,07 |
| C_8 | 1 | 7 | 0,07 | 1 | 7 | 0,07 |
| C_9 | 1 | 7 | 0,07 | 1 | 7 | 0,07 |
| C_{10} | 1 | 7 | 0,07 | 1 | 7 | 0,07 |

На данном этапе производили сортировку критериев – критерии сортировали по убыванию их относительной значимости s_i : $s_1 > s_2 > s_3 > \dots > s_n$.

Далее произвели выбор критериев, выбираются первые критерии с наибольшей относительной значимостью: $s_1 > s_2 > s_3 > \dots > s_n \Rightarrow \{c_1, c_2, c_3, \dots, c_k\}$.

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что наиболее важными критериями для обеспечения надёжности результатов контроля являются (для тела листа):

- максимальная допустимая условная площадь несплошностей;

- условная площадь максимально допустимой зоны несплошностей.

Для кромки листа:

- максимальная допустимая условная площадь несплошностей;

- условная площадь максимально допустимой зоны несплошностей;

- максимальная допустимая условная протяжённость несплошностей.

Эти критерии имеют наибольшую общую значимость и должны быть приоритетными при разработке стратегии контроля, определении приоритетов в оценке качества продукции и оптимизации процесса контроля.

Таким образом, результаты анализа позволяют определить приоритеты в выборе критериев для обеспечения надёжности результатов неразрушающего контроля.

Применение метода анализа иерархий. Для разработки взяли такие же критерии, как в предыдущем методе. Размер матрицы равен 10×10 . Была выбрана группа экспертов, задачей которых являлось заполнение матрицы взаимосвязи выбранных критериев (табл. 3). Градация $[0; 0,2; 0,5; 0,8; 1]$, где 0 – нет связи, 0,2 – слабое влияние, 0,5 – среднее влияние, 0,8 – высокое влияние, 1 – полная взаимосвязь.

Таблица 3. Исходная матрица
Table 3. Initial matrix

| Критерии | C_1 | C_2 | C_3 | C_4 | C_5 | C_6 | C_7 | C_8 | C_9 | C_{10} |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| C_1 | 1 | 0,2 | 0,2 | 1 | 0,5 | 1 | 0,2 | 0,2 | 0,5 | 0,2 |
| C_2 | 0,8 | 1 | 0,5 | 0,2 | 0,5 | 0,8 | 1 | 0,2 | 0,5 | 0,2 |
| C_3 | 1 | 0,5 | 1 | 0,8 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,5 | 0,2 |
| C_4 | 1 | 0,8 | 0,8 | 1 | 0 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 1 | 0,8 |
| C_5 | 0,8 | 0,8 | 0,5 | 0,2 | 1 | 0,8 | 0,8 | 0 | 0,2 | 0,8 |
| C_6 | 1 | 0,5 | 0,2 | 0,2 | 0,5 | 1 | 0,5 | 0,2 | 0,5 | 0,2 |
| C_7 | 0,8 | 1 | 0,2 | 0,2 | 0,5 | 0,8 | 1 | 0,8 | 0,2 | 0,2 |
| C_8 | 0,8 | 0,2 | 0,5 | 0,2 | 0,5 | 0,8 | 0,2 | 1 | 0,8 | 0,8 |
| C_9 | 0,5 | 0,2 | 0,8 | 0,8 | 0,5 | 0,8 | 0,5 | 0,5 | 1 | 0,2 |
| C_{10} | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,8 | 0,2 | 0,5 | 0,2 | 0,8 | 0,8 | 1 |

Затем осуществили преобразование матрицы в нечеткую. Исходные экспертные оценки содержат субъективные суждения о влиянии критериев. Нечеткая логика позволяет: учесть неопределенность и неточность человеческих оценок, превратить дискретные значения (0, 0,2, 0,5 и т.д.) в интервальные (тройки чисел), смягчить резкие границы между категориями влияния.

Это необходимо для того, чтобы перейти от бинарных («есть влияние/нет влияния») к более гибким оценкам, отражающим реальную степень взаимосвязи критериев.

Правило преобразования: $0 \rightarrow (0, 0, 0)$; $0,2 \rightarrow (0,1, 0,2, 0,3)$; $0,5 \rightarrow (0,4, 0,5, 0,6)$; $0,8 \rightarrow (0,7, 0,8, 0,9)$; $1 \rightarrow (1, 1, 1)$.

Следующим этапом определили значимость каждого критерия с учетом всех его взаимосвязей с другими критериями. Это необходимо для того, чтобы получить объективные весовые коэффициенты критериев (табл. 4).

Для каждого критерия C_i вычисляется геометрическое среднее его влияния.

$$\tilde{\omega}_i = \left(\prod_{j=1}^{10} \tilde{a}_{ij} \right)^{1/10}. \quad (4)$$

Затем произвели разложение по l, m, u :

$$\tilde{\omega}_i = \left(\prod_{j=1}^{10} l_{ij} \right)^{1/10}, \left(\prod_{j=1}^{10} m_{ij} \right)^{1/10}, \left(\prod_{j=1}^{10} u_{ij} \right)^{1/10}. \quad (5)$$

Таблица 4. Нечеткие весовые коэффициенты
Table 4. Fuzzy weighting factors

| Нечеткий вес $\tilde{\omega}_i$ | Значение |
|---------------------------------|--------------------|
| $\tilde{\omega}_1$ | (0,16; 0,38; 0,55) |
| $\tilde{\omega}_2$ | (0,28; 0,48; 0,65) |
| $\tilde{\omega}_3$ | (0,18; 0,35; 0,50) |
| $\tilde{\omega}_4$ | (0,28; 0,43; 0,56) |
| $\tilde{\omega}_5$ | (0,30; 0,45; 0,58) |
| $\tilde{\omega}_6$ | (0,16; 0,32; 0,45) |
| $\tilde{\omega}_7$ | (0,23; 0,38; 0,52) |
| $\tilde{\omega}_8$ | (0,26; 0,45; 0,62) |
| $\tilde{\omega}_9$ | (0,29; 0,48; 0,65) |
| $\tilde{\omega}_{10}$ | (0,29; 0,48; 0,65) |

Затем производили преобразование нечетких интервальных оценок в конкретные числовые значения, приведение весовых коэффициентов к единой шкале (сумма равна 1).

Это необходимо для того, чтобы сравнивать критерии между собой, использовать весовые коэффициенты в практических расчетах (например, при интегральной оценке качества), принимать обоснованные решения на основе четких числовых данных.

$$\omega_i = \frac{l_i + m_i + u_i}{3}. \quad (6)$$

Формула для нормализации:

$$W_i = \frac{\omega_i}{\sum_{i=1}^{10} \omega_i}. \quad (7)$$

Числовые данные ω_i и W_i :

| | | | | | | | | | |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|---------------|
| ω_1 | ω_2 | ω_3 | ω_4 | ω_5 | ω_6 | ω_7 | ω_8 | ω_9 | ω_{10} |
| 0,36 | 0,47 | 0,34 | 0,42 | 0,44 | 0,31 | 0,38 | 0,44 | 0,47 | 0,47 |
| W_1 | W_2 | W_3 | W_4 | W_5 | W_6 | W_7 | W_8 | W_9 | W_{10} |
| 0,088 | 0,115 | 0,083 | 0,102 | 0,107 | 0,076 | 0,093 | 0,107 | 0,115 | 0,115 |

Проверка суммы нормализованных весовых коэффициентов: $\sum W_i = 0,088 + 0,115 + 0,083 + 0,102 + 0,107 + 0,076 + 0,093 + 0,107 + 0,115 + 0,115 = 1,00$ (100%).

Далее произвели оценку, насколько непротиворечивы были экспертные мнения, можно ли доверять полученным результатам. Это необходимо для того, чтобы обнаружить и устранить логические противоречия в матрице.

Умножаем матрицу на вектор (то есть произведение матрицы A на вектор W): для каждой строки i : $(AW)_i = \sum (a_{ij} \times w_j)$ для j от 1 до 10.

| Критерий | AW | W | AW/W |
|----------|-------|-------|------|
| C_1 | 0,480 | 0,088 | 5,45 |
| C_2 | 0,540 | 0,115 | 4,70 |
| C_3 | 0,430 | 0,083 | 5,18 |
| C_4 | 0,520 | 0,102 | 5,10 |
| C_5 | 0,530 | 0,107 | 4,95 |
| C_6 | 0,410 | 0,076 | 5,39 |
| C_7 | 0,490 | 0,093 | 5,27 |
| C_8 | 0,530 | 0,107 | 4,95 |
| C_9 | 0,540 | 0,115 | 4,70 |
| C_{10} | 0,540 | 0,115 | 4,70 |

$$\lambda_{\max} = 10,45.$$

Затем рассчитали индекс согласованности ИС:

$$ИС = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, \quad n = 10, \quad (8)$$

где n – размер матрицы.

ИС < 0,1 – матрица считается согласованной.

$$ИС = (10,45 - 10) / 9 = 0,05.$$

Отношение согласованности (ОС): ОС = ИС / СИ; для матрицы 10×10 случайный индекс СИ = 1,49, тогда ОС = 0,05 / 1,49 = 0,033 (3,3%).

Матрица обладает хорошей согласованностью (ИС < 0,1; ОС < 10%), следовательно, экспертные оценки не содержат существенных противоречий. Результаты могут быть использованы для принятия решений (табл. 5).

Таблица 5. Итоговые весовые коэффициенты критериев

Table 5. Final weighting factors of the criteria

| Критерии | C_1 | C_2 | C_3 | C_4 | C_5 | C_6 | C_7 | C_8 | C_9 | C_{10} |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| Весовой коэффициент (нормализованный), % | 8,8 | 11,5 | 8,3 | 10,2 | 10,7 | 7,6 | 9,3 | 10,7 | 11,5 | 11,5 |
| Ранг | 9 | 1-2 | 10 | 5 | 3-4 | 11 | 7 | 3-4 | 1-2 | 1-2 |

Наиболее важные критерии:

– C_2 (11,5%): максимальная допустимая условная площадь несплошностей.

– C_9 (11,5%): минимальное расстояние между условными границами одиночных несплошностей.

– C_{10} (11,5%): число несплошностей на всей площади единицы листового проката.

Заключение

Построенная модель наглядно демонстрирует нелинейную зависимость между строгостью контроля и результатом приемки, позволяя прогнозировать поведение сторон и обосновывать выбор контрольных параметров, выходя за рамки простого соответствия стандарту.

Применение метода анализа иерархий и преобразования матриц парных сравнений позволяет перейти от субъективных экспертных оценок к объективной,

количественно обоснованной системе взвешивания критериев ультразвукового контроля. Это дает возможность сформировать оптимальный и минимально достаточный набор параметров для отбраковки.

Предложенный подход позволяет комплексно решить задачу повышения эффективности процесса ультразвукового контроля металлопродукции.

Математическая модель дает понимание динамики взаимодействия «потребитель-производитель» и обосновывает общий уровень строгости контроля, учитывая стандарты и природу дефектов.

Метод анализа иерархий предоставляет строгий математический аппарат для определения значимости отдельных критериев отбраковки и формирования результирующего набора, обеспечивающего максимальную эффективность контроля при минимальной избыточности.

Практическая реализация данного подхода позволит повысить объективность, надежность и экономическую эффективность процессов неразрушающего контроля в металлургической и машиностроительной отраслях.

Список источников

1. Анализ эффективности существующей системы оценки качества материалов, изделий и конструкций на опасных производственных объектах / Наркевич М.Ю., Корниенко В.Д., Логунова О.С., Полякова М.А., Извеков Ю.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т. 19. № 2. С. 103-111.
2. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. Неразрушающий контроль: справочник. В 7 т. / под общ. ред. В.В. Ключева. Т. 3: Ультразвуковой контроль. М.: Машиностроение, 2004. 864 с.
3. Xiaolong S. Application of ultrasonic non-destructive testing in industrial pipeline inspection // Applied Mathematics and Nonlinear Sciences. 2024, vol. 9(1), pp. 1-16.
4. Fan Z., Bai K., Chen C. Ultrasonic testing in the field of engineering joining // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2024, vol. 132(9-10), pp. 1-26.
5. Маркевич А.В., Полякова М.А. Применение методов неразрушающего контроля для выявления дефектов горячекатаного металлопроката // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. Вып. 3. С. 285-291.
6. Маркевич А.В., Полякова М.А., Конищев А.В. О необходимости количественной оценки достоверности определения внутренних дефектов металлопроката // Контроль. Диагностика. 2025. Т. 28, № 2. С. 30-37. DOI:10.14489/td.2025.02. pp.030-037.
7. Автоматизация научных исследований нарушения сплошности плоской поверхности: конструкционное решение программно-аппаратного комплекса / Логунова О.С., Андреев С.М., Гарбар Е.А., Маркевич А.В., Николаев А.А. // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 1 (46). С. 54-59.
8. Волченко В.Н. Вероятность и достоверность оценки качества металлоконструкций. М.: Металлургия, 1979. 88 с.
9. Коновалов Н.Н. Нормирование дефектов и достоверность неразрушающего контроля сварных соединений. М.: ГУП НТЦ ПБ, 2004. 132 с.
10. Власов И.Э., Иванов В.И. О дефектометрических подходах в ультразвуковом контроле // Дефектоскопия. 1998. № 2. С. 41-46.
11. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / пер. с англ. Р.Г. Вачнадзе. М.: Радио и связь, 1993. 278 с.

References

1. Narkevich M.Yu., Kornienko V.D., Logunova O.S., Polyakova M.A., Izvekov Yu.A. Analysis of efficiency of the existing quality assessment system for materials, products, and structures at hazardous production facilities. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021;19(2):103-111. (in Russ.)
2. Ermolov I.N., Lange Yu.V. *Nerazrushayushchiy kontrol: spravochnik* [Nondestructive testing: reference book]. In 7 volumes. Vol 3. Ultrasonic testing. Moscow: Mashinostroeniye, 2004, 864 p. (In Russ.)
3. Xiaolong S. Application of ultrasonic nondestructive testing in industrial pipeline inspection. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*. 2024;9(1):1-16.
4. Fan Z., Bai K., Chen C. Ultrasonic testing in the field of engineering joining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024;132(9-10):1-26.
5. Markevich A.V., Polyakova M.A. Application of nondestructive testing methods to search the defects of hot rolled steel product. *Izvestiya Tulskego gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya Tula State University. Technical Sciences]. 2024;3:285-291. (in Russ.)
6. Markevich A.V., Polyakova M.A., Konishchev A.V. About the necessity of quantitative assessment, the validity of the detection of internal defects in rolled metal product. *Kontrol. Diagnostika* [Testing. Diagnostics]. 2025;28(2):30-37. (in Russ.)
7. Logunova O.S., Andreev S.M., Garbar E.A., Markevich A.V., Nikolaev A.A. Automation of scientific research of flat surface discontinuities: structural solution of a hardware-software complex. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes]. 2020;(1(46)):54-59. (in Russ.)
8. Volchenko V.N. *Veroyatnost i dostovernost otsenki kachestva metallokonstruksiy* [Probability and certainty of metal constructions' quality assessment]. Moscow: Metallugiia, 1979, 88 p. (in Russ.)
9. Konovalov N.N. *Normirovanie defektov i dostovernost nerazrushayushhego kontrolya svarnykh soedineniy* [Standardization of defects and reliability of non-destructive testing of welded joints]. Moscow: State Unitary Enterprise "Scientific and Technical Center for Industrial Safety" Publishing House, 2004, 132 p. (in Russ.)
10. Vlasov I.E., Ivanov V.I. About defectometric approaches in ultrasonic testing. *Defektoskopiya* [Russian Journal of Nondestructive Testing]. 1998;(2):41-46. (in Russ.)
11. Saati T. *Prinyatie resheniy. Metod analiza ierarkhiy* [Decision making. Hierarchy analysis technique]. Translated from Eng. by Vachnadze R.G. Moscow: Radio i Svyaz, 1993, 278 p. (in Russ.)

Поступила 13.10.2025; принята к публикации 13.11.2025; опубликована 31.03.2026
Submitted 13/10/2025; revised 13/11/2025; published 31/03/2026

Маркевич Артем Валерьевич – кандидат технических наук, начальник лаборатории дефектоскопии и радиационной безопасности, Центральная лаборатория контроля, ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», Магнитогорск, Россия.
Email: markevich.av@mmk.ru. ORCID 0009-0008-1518-1162

Artem V. Markevich – PhD (Eng.), Head of the Laboratory of Non-Destructive Testing and Radiation Safety, Central Control Laboratory, PJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works, Magnitogorsk, Russia.
Email: markevich.av@mmk.ru. ORCID 0009-0008-1518-1162

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 006.015
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-1-108-115



РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ГОТОВНОСТИ НОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

Родионов Н.В., Загидуллин Р.С.

Самарский национальный исследовательский университет им. С.П. Королева, Самара, Россия

Аннотация. При выполнении на промышленных предприятиях научно-исследовательских опытно-конструкторских и технологических работ наблюдается проблема, при которой реализация новейших изделий сопровождается технико-экономическими рисками, ведущими к срыву выполнения этапов жизненного цикла создаваемых новых изделий. В обеспечении решения проблемы поставлена задача, которая заключается в том, чтобы на этапе проектирования новых изделий усовершенствовать оценку технологической готовности и качества новых технических решений. Цель исследования заключается в практической апробации разработанной методики оценки качества и технологической готовности альтернативных исполнений признаков новых технических решений. При решении поставленной задачи использована экспертная шкала оценки технологической готовности проектов, а также многокритериальный экспертный метод оценки показателей качества альтернативных исполнений признаков новых технических решений. Новизна исследования заключается в создании методики экспертной оценки альтернативных исполнений признаков новых технических решений, отличающихся от аналогичных методик алгоритмом, способным осуществлять отбор и формирование компонентного состава альтернативных исполнений новых технических решений с максимизированными значениями оценок технологической готовности и показателей качества. Результаты исследования представляют собой: разработанную блок-схему, отражающую порядок оценки альтернативных исполнений признаков новых технических решений при проектировании разработок на промышленном предприятии; разработанный бланк по заполнению экспертных оценок качества и технологической готовности альтернативных исполнений признаков новых технических решений; разработанную математическую зависимость между показателями качества и технологической готовности альтернативных исполнений признаков новых технических решений. Выполнена апробация разработанной методики оценки качества и технологической готовности альтернативных исполнений признаков новых технических решений на примере изобретения, относящегося к головному обтекателю ракеты-носителя космического назначения. Практическая значимость исследования заключается в повышении качества проектирования новейших разработок.

Ключевые слова: разработка, технологическая готовность, новое техническое решение, изобретение, качество, методика, алгоритм, экспертный метод

© Родионов Н.В., Загидуллин Р.С., 2026

Для цитирования

Родионов Н.В., Загидуллин Р.С. Разработка методики оценки качества и технологической готовности новых технических решений // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №1. С. 108-115. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-108-115>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR ASSESSING THE QUALITY AND TECHNOLOGICAL READINESS OF NEW TECHNICAL SOLUTIONS

Rodionov N.V., Zagidullin R.S.

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, Samara, Russia

Abstract. When performing research, development and technological work at industrial enterprises, there is a problem in which the implementation of the latest products is accompanied by technical and economic risks leading to disruption of the life cycle stages of the new products. In order to provide a solution to the problem, the task is to improve the assessment of technological readiness and quality of new technical solutions at the design stage of new products. The objective of the research is to practically test the developed methodology for assessing the quality and technological readiness of alternative implementations of the features of new technical solutions. To solve this problem, an expert scale for assessing the technological readiness of projects has been used, as well as a multi-criteria expert method for assessing the quality indicators of alternative implementations of features of new technical solutions. The novelty of the research lies in the creation of a methodology for expert assessment of alternative implementations of features of new technical solutions, which differ from similar methods by an algorithm capable of selecting and forming a component composition of alternative implementations of new technical solutions with maximized values of technological readiness estimates and quality indicators. The research results include: a developed flowchart reflecting the procedure for assessing alternative implementations of features of new technical solutions when designing developments at an industrial enterprise; a developed form for completing expert assessments of the quality and technological readiness of alternative implementations of features of new technical solutions; a developed mathematical relationship between the quality and technological readiness indicators of alternative implementations of features of new technical solutions. The developed methodology for assessing the quality and technological readiness of alternative implementations of the features of new technical solutions has been tested using the example of an invention related to the nose fairing of a space-purpose launch vehicle. The practical significance of the research lies in improving the design quality of the latest developments.

Keywords: development, technological readiness, new technical solution, invention, quality, methodology, algorithm, expert method

For citation

Rodionov N.V., Zagidullin R.S. Development of a Methodology for Assessing the Quality and Technological Readiness of New Technical Solutions. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 1, pp. 108-115. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-108-115>

Введение

Изобретательская деятельность осуществляется при выполнении на предприятиях научно-исследовательских опытно-конструкторских и технологических работ (НИОКТР). В состав результатов изобретательской деятельности входят новые технические решения, которые представляют собой концепции реализации технических задач. При этом концепции выражаются на разных уровнях детализации описания взаимодействующих признаков (детали, устройства, приспособления и т.д.). Результаты исследования [1] показывают, что при выполнении проектных работ НИОКТР осуществляется отбор новых технических решений с учетом их оценок качества и технологической готовности.

Анализ публикаций [2-9] показывает, что для сравнительной оценки технологической готовности и показателей качества новых технических решений применяются многокритериальные экспертные подходы (шкала оценки технологической готовности проектов (technology readiness level – TRL), метод анализа иерархий (МАИ); метод ELECTRE, метод БОФа и т.д.) для

увеличения точности принятия решений по выбору оптимизируемых новых технических решений. Необходимо увеличивать точность оценки рангов технологической готовности и качества новых технических решений на основе вышеуказанных подходов для повышения качества принятия решений по использованию конкурентоспособных новых технических решений. При этом, согласно данным Роспатента за 2024 год, доля используемых объектов интеллектуальной собственности, относящихся к техническим решениям, составляет 11% [10].

В связи с вышеизложенным наблюдается проблема по отсутствию инструментария, обеспечивающего проведение оценки показателей качества и практической реализации новых технических решений по их признакам. Определены следующие задачи: разработать бланк экспертного метода оценки качества и технологической готовности альтернативных исполнений признаков новых технических решений; разработать математические выражения для ранжирования и формирования компонентного состава альтернативных исполнений признаков новых техниче-

ских решений по оптимизируемым значениям показателей качества и технологической готовности; разработать блок-схему, отражающую последовательность этапов реализации разработанной модели, и провести её апробацию.

Новизна исследования заключается в том, что разработанная методика способствует формированию компонентного состава альтернативных исполнений признаков новых технических решений по оптимизируемым значениям оценок технологической готовности и показателей качества. Актуальность исследования выражается в том, что использование разработанной методики способствует повышению точности оценки технологической готовности и показателей качества новых технических решений. Кроме того, промышленные предприятия, используя разработанную методику, способны увеличить полезный эффект от использования новых технических решений при реализации НИОКТР.

Разработанная методика подлежит к применению в конструкторских подразделениях промышленных предприятий и является инструментарием по экспертизе новых технических решений. Результаты методики представляют собой определение рангов показателей технологической готовности и качества альтернативных исполнений признаков новых технических решений. Использование полученных результатов способствует реализации положений методологии по совершенствованию качества производственных процессов «Шесть сигм» [11, 12]. Также стоит отметить, что разработанная методика способствует формированию производственных отчетов как по оценке эффективности управления НИОКТР, так и повышению технико-экономических показателей создаваемых новейших разработок на промышленных предприятиях. Теоретическая значимость исследования заключается в разработанной методике оценки технологической готовности и показателей качества альтернативных исполнений признаков новых технических решений на основе многокритериального экспертного метода и шкалы TRL.

Практическая значимость исследования заключается в полученных результатах, отражающих концептуальные положения по стандартизации оценки показателей качества и технологической готовности альтернативных исполнений признаков новых технических решений. Цель создания методики для промышленных предприятий заключается в оценке рангов показателей качества и технологической готовности альтернативных исполнений признаков новых технических решений на примере изобретения, относящегося к головному обтекателю ракеты-носителя космического назначения.

Материалы и методы исследования

По результатам анализа публикаций [13, 14] установлено, что оценка качества и технологической готовности новых технических решений осуществляется экспертной комиссией, в состав которой входят

специалисты инженерных специальностей. При этом отметим, что организация проведения оценки новых технических решений осуществляется организационно-распорядительной документацией по предприятию для определения новых технических решений, обладающих максимизированными оценками технологической готовности и показателей качества.

Ниже представлена разработанная блок-схема организации оценки альтернативных исполнений признаков новых технических решений по показателям качества и технологической готовности (рис. 1).

По рис. 1 отметим, что разработанная блок-схема способствует определению новых технических решений с максимизированными оценками технологической готовности и показателей качества альтернативных исполнений признаков изобретений. Отличительная особенность блок-схемы заключается в том, что посредством организации оценки новых технических решений обеспечивается контроль эффективности проводимых НИОКТР на промышленных предприятиях.

По результатам анализа публикации [15] отметим, что при оценке технологической готовности новых технических решений наиболее широко используется шкала TRL. При применении шкалы TRL по проектам НИОКТР каждый член экспертной комиссии присваивает значение экспертной бальной оценки, характеризующее степень текущей готовности промышленного предприятия к реализации новых технических решений, а именно: 1 – основные принципы признака изучены и опубликованы; 2 – концепция признака и/или его применения сформулированы; 3 – критические функции и/или характеристики признака подтверждены аналитическим и экспериментальным путем; 4 – компонент и/или макет признака испытаны в лабораторном окружении; 5 – компонент и/или макет признака испытаны в окружении, близком к реальному; 6 – модель прототипа признака продемонстрирована в окружении, близком к реальному; 7 – прототип признака продемонстрирован в условиях эксплуатации; 8 – признак завершен и квалифицирован в ходе испытаний и демонстраций; 9 – признак подтвержден путем успешной эксплуатации.

По результатам анализа публикаций [16-18] установлено, что использование шкалы TRL осуществляется с многокритериальными экспертными методами (метод анализ иерархий (МАИ); метод ELECTRE, метод БОФа и т.д.). При этом общими свойствами многокритериальных экспертных методов являются: определение номенклатуры оцениваемых объектов и их критериев; оценка весов значимости критериев; формирование экспертных оценок в отношении критериев оцениваемых объектов на основе бальной шкалы; получение результирующих показателей рангов качества критериев оцениваемых объектов; оценка качества согласования значений экспертных оценок, сформированных членами экспертной комиссии; ранжирование оцениваемых объектов с последующим выбором наиболее оптимизированного по значимым критериям.



Рис. 1. Блок-схема организации оценки качества и технологической готовности альтернативных исполнений признаков новых технических решений

Fig. 1. Flowchart of the organization of an assessment of quality and technological readiness of alternative implementations of features of new technical solutions

Получение результирующих значений показателей рангов качества новых технических решений определяется по формуле

$$R_{i_i} = \sum_{n=1}^n k_{f_i} \cdot o_{f_i}^{A_i}, \quad (1)$$

где n – количество i -х критериев оценки новых технических решений; $o_{f_i}^{A_i}$ – значение экспертной оценки критерия f_i оцениваемого нового технического решения A_i ; k_{f_i} – значение экспертной оценки веса значимости критерия f_i .

Отметим, что среди существующих моделей по оценке качества согласования значений экспертных оценок наиболее широко используется коэффициент конкордации Кендалла [19]:

$$W_{i_i} = \frac{12S}{m^2(n^3 - n)}, \quad (2)$$

где S – сумма квадратов разности между значениями показателей рангов качества новых технических решений и от их среднего значения; n – количество показателей качества; m – количество экспертов.

В обеспечение совершенствования выражений (1), (2), а также реализации разработанной блок-схемы, приведенной на рис. 1, определено выражение, способствующее определению ранга качества и технологической готовности альтернативных исполнений признаков новых технических решений:

$$K_{\text{ТТК}}^{\text{НТР}} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n \max(\text{ОТГ}_{\text{АИ}_i}^{\text{ПР}_i})}{n} \right) + \left(\frac{\sum_{i=1}^m \left(\max \left(\sum_{i=1}^n \text{ОК}_{\text{АИ}_i}^{\text{ПК}_i} + \text{ВПК}_i \right) \right)}{n \cdot m} \right), \quad (3)$$

где $\text{ОТГ}_{\text{АИ}_i}^{\text{ПР}_i}$ – значение экспертной оценки технологической готовности альтернативного исполнения (АИ_i) оцениваемого признака (ПР_i); $\text{ОК}_{\text{АИ}_i}^{\text{ПК}_i}$ – значение экспертной оценки показателя качества (ПК_i); ВПК_i – значение веса значимости показателя качества (ПК_i); m – количество показателей качества (ПК_i); n – количество оцениваемых признаков в новом техническом решении.

Далее определяются нормированные значения коэффициента (3), используя показатель нормализации [20]:

$$N_{\text{норм}} = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad (4)$$

где x_i – среднее значение $K_{\text{ПК}}^{\text{АИ}_i \text{ОПТ}}$; x_{\min} – минимальное среднее значение $K_{\text{ПК}}^{\text{АИ}_i \text{ОПТ}}$; x_{\max} – максимальное среднее значение $K_{\text{ПК}}^{\text{АИ}_i \text{ОПТ}}$.

После определения показателя нормализации осуществляется оценка качества согласованности

экспертных оценок посредством коэффициента корреляции Кендалла (2).

Результаты и их обсуждение

Экспертной комиссией в составе не менее пяти высококвалифицированных специалистов осуществлена апробация разработанной методики на примере изобретения, обеспеченного правовой охраной в форме интеллектуальной собственности: способ возврата головного обтекателя [20]. Фрагменты схематичного изображения описания работоспособности изобретения представлены на **рис. 2**.

При оценке способа возврата головного обтекателя в отношении их признаков (парашют, баллон вы-

сокого давления, ракетный двигатель, вертолет и крюк для захвата створки) осуществлено формирование наборов их альтернативных исполнений, описанных в международном патентном фонде [21]. При этом по каждому альтернативному исполнению каждым членом экспертной комиссии проведена оценка критерия технологической готовности, а также показателей качества: уменьшение площади разброса створок головного обтекателя; уменьшение риска механических повреждений створок головного обтекателя, а также уменьшение массы створок головного обтекателя. Ниже изображен фрагмент заполненного бланка разработанной методики (см. **таблицу**).

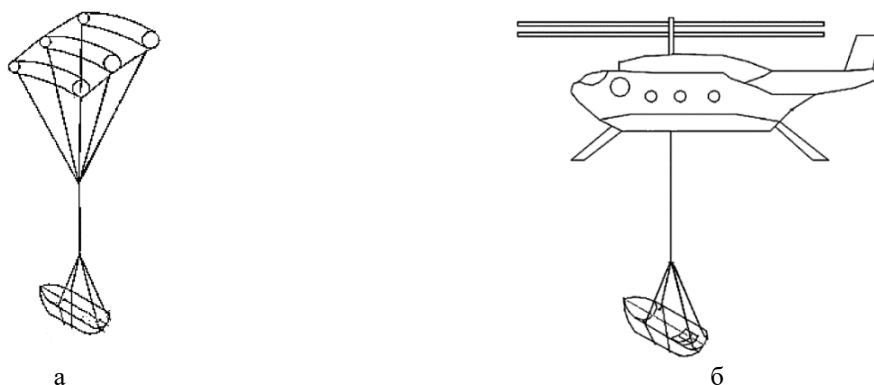


Рис. 2. Изображение работоспособности способа возврата головного обтекателя:
 а – спуск створки после раскрытия обтекателя в космическом пространстве;
 б – транспортировка створки вертолетом

Fig. 2. Image of operability of the nose fairing recovery method: a is descent of a fairing half after payload fairing separation in outer space; б is helicopter transport of the fairing half

Таблица. Фрагмент заполненного бланка экспертных оценок
 Table. Fragment of the completed form of expert estimates

| Наименование признака | Альтернативное исполнение признака | TRL | Показатели качества | | |
|----------------------------------|---|-----|--|--|-------------------------------------|
| | | | Уменьшение площади разброса створок обтекателя | Уменьшение риска механических повреждений створок обтекателя | Уменьшение массы створок обтекателя |
| Парашют | Парашют, выполненный в прямоугольной форме. Купол, состоящий из нескольких полотнищ, соединенных силовыми лентами | 5 | 3 | 3 | 1 |
| | Парашют, выполненный в круглой форме с коаксильными кольцами | 5 | 3 | 1 | 3 |
| Газовый баллон высокого давления | Парашют, выполненный в крестообразной форме и состоящий из коротких лопастей | 7 | 9 | 9 | 9 |
| | Баллон высокого давления, включающий корпус, выполненный в виде трубной оболочки | 9 | 1 | 1 | 3 |
| | Баллон высокого давления, содержащий металлический лайнер, включающий обечайку, в которой созданы напряжения сжатия | 2 | 9 | 3 | 9 |

По таблице отметим, что значения экспертных оценок показателей качества принадлежат бальному диапазону $\{-5;5\}$. При этом 0 баллов характеризуется тем, что альтернативное исполнение признака не влияет на оцениваемый показатель качества. Баллы диапазона $\{-5;-1\}$ характеризуются уменьшением показателей качества по оцениваемому альтернативному исполнению признака. Баллы диапазона $\{1;5\}$, наоборот, характеризуются увеличением показателей качества по оцениваемому альтернативному исполнению признака.

Далее представлены результаты расчетов по показателям (3), (4) (рис. 3).

По рис. 3 отметим, что наиболее максимизированные оценки технологической готовности и качества альтернативных исполнений по выражениям (3), (4) в отношении оцениваемого изобретения имеют следующие признаки: вертолет «1» [22], крюк для захвата створки «0,9» [23], а также баллон высокого давления «0,8» [24]. Отметим, что принятие решения о достаточности результатов оценки новых технических решений осуществляется в случае, если по всем признакам значение коэффициента (4) составляет «1». При этом получен высокий уровень качества согласованности значений экспертных оценок из выражения (4): коэффициент конкордации Кендалла равен 0,86. По альтернативным исполнениям признаков крюка для захвата створки, баллона высокого давления, ракетного двигателя [25], а также парашюта [26] рекомендуется осуществить работы по доведению описания работоспособности изобретений на уровне концепций таким образом, чтобы при оценке критериев технологической готовности и качества достигнуть значения коэффициента по выражению (4) – «1».

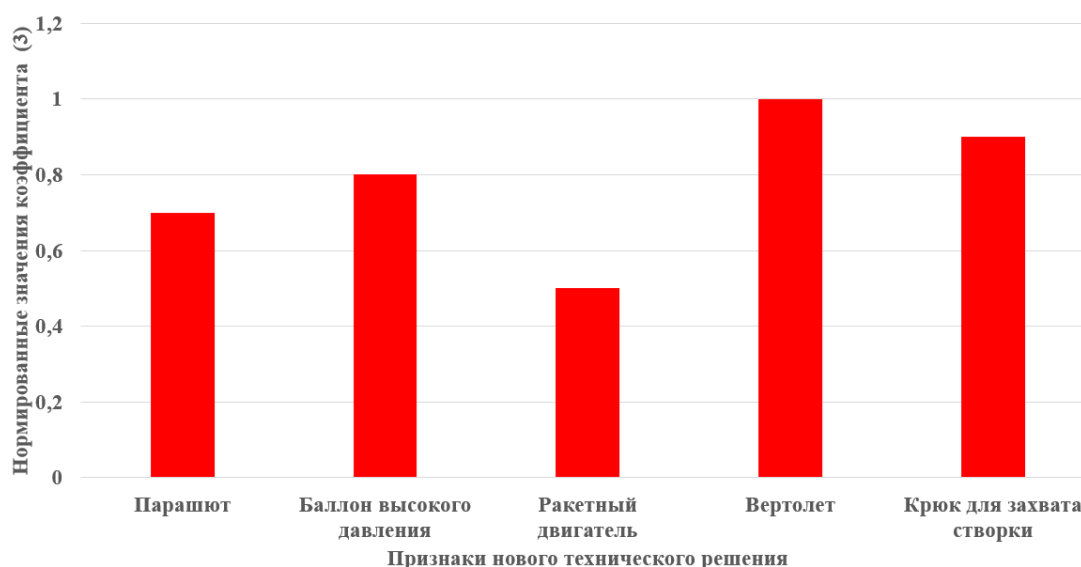


Рис. 3. График оценки технологической готовности и качества признаков способа возврата обтекателя
Fig. 3. Graph of an assessment of technological readiness and quality of the features of the fairing recovery method

Заключение

Таким образом, разработанная методика позволяет оценивать технологическую готовность и показатели качества новых технических решений по альтернативным исполнениям их признаков, что способствует повышению точности в принятии решения о целесообразности создания технических изделий по сравнению с используемыми экспертными подходами, в которых осуществляется сравнительная оценка технологической готовности и показателей качества полной номенклатуры признаков новых технических решений.

Методика применима по отношению к новым техническим решениям, относящихся к общему машиностроению. При этом достоверность экспертных оценок технологической готовности и совершенствования качества оцениваемых новых технических решений обосновывается экспертными суждениями высококвалифицированных специалистов промышленных предприятий и научно-исследовательских институтов, имеющих соответствующий опыт и технологическую инфраструктуру для реализации приоритетных альтернативных исполнений признаков оцениваемых новых технических решений.

Список источников

1. Hu Z., Zhou X., Lin A. Evaluation and identification of potential high-value patents in the field of integrated circuits using a multidimensional patent indicators pre-screening strategy and machine learning approaches // Journal of informetrics. 2023, vol. 17, no. 2, pp. 101406.
2. Cancio I., Kruja D., Iancu T. AHP, a reliable method for quality decision making: a case study in business // Sustainability. 2021, vol. 13, no. 24, pp. 13932.

3. Kaymaz Ç.K., Birinci S., Kızılkın Y. Sustainable development goals assessment of erzurum province with SWOT-AHP analysis. // *Environment, development and sustainability*. 2022, vol. 24, no. 3, pp. 2986-3012.
4. Šostar M., Ristanović V. Assessment of influencing factors on consumer behavior using the AHP model // *Sustainability*. 2023, vol. 15, no. 13, pp. 10341.
5. Sutarmin S. Analysis of student constraints in entrepreneurship through the analytical hierarchy process (AHP) approach // *Jurnal maksipreneur: manajemen, koperasi, dan entrepreneurship*. 2023, vol. 12, no. 2, pp. 316-328.
6. Flood vulnerability of a few areas in the foothills of the western ghats: a comparison of AHP and F-AHP models / C.P. Senan, R.S. Ajin, J.H. Danumah, R. Costach, A. Arabameri, A. Rajaneesh, S. L. Kuriakose // *stochastic environmental research and risk assessment*. 2023, vol. 37, no. 2, pp. 527-556.
7. Decision support system based on the ELECTRE method / O. Havrylenko, K. Dergachov, V. Pavlikov, S. Zhyla, O. Shmatko, N. Ruzhentsev, B. Kuznetsov // *In data science and security: proceedings of IDSCS 2022*. 2022, pp. 295-304.
8. Yini L., Zhanjun W. The technology readiness assessment of nuclear power system in fnpp based on the integration of delphi and ahp method // *In the proceedings of the international conference on nuclear engineering (ICONE)*. 2023, vol. 30, pp.1307.
9. Gu J., Kim H., Lim H. Electrified steam cracking for a carbon neutral ethylene production process: techno-economic analysis, life cycle assessment, and analytic hierarchy process // *Energy conversion and management*. 2022, vol. 270, pp. 116256.
10. Роспатент в цифрах и фактах 2024 // Роспатент: электрон. отчет. 2025. URL: <https://rospatent.gov.ru> (дата обращения: 17.03.2025).
11. Amjad M. H. H., Shovon M. S. S., Hasan A. M. Analyzing lean six sigma practices in engineering project management: a comparative analysis // *Innovatech engineering journal*. 2024, vol. 1, no. 1, pp. 245-255.
12. The performance improvement analysis using six sigma DMAIC methodology: a case study on Indian manufacturing company / A. Mittal, P. Gupta, V. Kumar, Al Owad , S. Mahlawat , S. Singh // *Heliyon*. 2023, vol. 9, no. 3, pp. 257-259.
13. A critical review on combining adsorption and photocatalysis in composite materials for pharmaceutical removal: pros and cons, scalability, TRL, and sustainability / S. Ahmadi, J. M. Quimbayo, V. B. K. Yaah, S. B. de Oliveira, S. Ojala // *Energy nexus*. 2025, 100396.
14. Kar T., Veluswamy H. P. To nip it or let it bloom: life cycle assessment of lab-scale catalysts used in low-TRL CCUS technologies // *Sustainable chemistry for climate action*. 2025, 100057.
15. Yadav K., Singh M. Design and development of a bidirectional DC net meter for vehicle to grid technology at TRL-9 level // *Measurement*. 2023, vol. 207, pp. 112403.
16. Guidi G., Goffo G., Violante A. C. Application of the analytic hierarchy process (AHP) method to identify the most suitable approach for managing irradiated graphite // *Nuclear engineering and technology*. 2024, vol. 56, no. 11, pp. 4820-4825.
17. An agile compliance framework for the european cooperation for space standardization / M.K.S. Al-Mhdawi, N. Dacre, M. Brito, D. Baxter, K. Xu, C. Young // *In 2023 IEEE aerospace conference*, pp. 1-12.
18. Kim S.M., Salman M., Léonard G. Application of decision support tool (DST) based on analytical hierarchy process for screening of carbon capture technologies // *In GHGT 16-16th international conference on greenhouse gas control technologies*. 2022, pp. 20-22.
19. Мурадова С.И., Сулейманов Р.Д. Оценка уровня конкурентоспособности инновационных решений // *Каспий и глобальные вызовы: материалы международной научно-практической конференции*. Астрахань, 2022. С. 781-785.
20. Xiaobo P., Liwei Z., Fashu S. *Sposob vozvrata golovnoogo obtekatel'ya* [Rocket fairing recovery system and method]. Patent CN, no. 111174646, 2020.
21. Всемирная организация интеллектуальной собственности (World Intellectual Property Organization – WIPO // *Patentscope* 2025. <https://www.wipo.int/en/web/patentscope> (дата обращения: 17.03.2025).
22. Пат. 146908 Российская Федерация, МПК В64D 1/22. Вертолет для монтажных и спасательных работ / Л.К. Козловский, В.Л. Козловский, Г.С. Мальцев; заявитель и патентообладатель: Л.К. Козловский. № 2014125985/11; заявл. 26.06.2014; опубл. 20.10.2014.
23. Пат. 906895 Союз Советских Социалистических Республик, МПК В66С 1/36. Грузовой крюк / С.В. Грудин, В.А. Захаров, Б.П. Цыганов; № 2887630; заявл. 25.02.1980; опубл. 23.02.1982.
24. Пат. 21640 Российская Федерация, МПК F 17 С 1/00. Баллон высокого давления / С.А. Федулов; заявитель и патентообладатель: закрытое акционерное общество «Научно-производственная компания «БАЛКО»; № 2001119367/20; заявл. 12.07.2001; опубл. 27.01.2002.
25. Пат. 2138669 Российская Федерация, МПК F 02 К 9/08. Воздушный ракетный двигатель / А.М. Гнедых; заявитель и патентообладатель: А.М. Гнедых; № 97111027/06; заявл. 02.07.1997; опубл. 27.09.1999.
26. Пат. 2774854 Российская Федерация, МПК В 64 D 17/34. Парашют / В.Н. Шатохин, В.К. Кочергин, В.Н. Ананьев; заявитель и патентообладатель: общество с ограниченной ответственностью «Параавис»; № 2021138204; заявл. 22.12.2021; опубл. 23.06.2022.

References

1. Hu Z., Zhou X., Lin A. Evaluation and identification of potential high-value patents in the field of integrated circuits using a multidimensional patent indicators pre-screening strategy and machine learning approaches. *Journal of informetrics*. 2023;17(2):101406.
2. Canco I., Kruja D., Iancu T. AHP, a reliable method for quality decision making: a case study in business. *Sustainability*. 2021;13(24):13932.
3. Kaymaz Ç.K., Birinci S., Kızılkın Y. Sustainable development goals assessment of erzurum province with SWOT-AHP analysis. *Environment, development and sustainability*. 2022;24(3):2986-3012.
4. Šostar M., Ristanović V. Assessment of influencing factors on consumer behavior using the AHP model. *Sustainability*. 2023;15(13):10341.
5. Sutarmin S. Analysis of student constraints in entrepreneurship through the analytical hierarchy process (AHP)

- approach. *Jurnal maksipreneur: manajemen, koperasi, dan entrepreneurship*. 2023;12(2):316-328.
6. Senan C.P., Ajin R.S., Danumah J.H., Costach R., Arabameri A., Rajaneesh A., Kuriakose S.L. Flood vulnerability of a few areas in the foothills of the western ghats: a comparison of AHP and F-AHP. *Stochastic environmental research and risk assessment*. 2023;37(2):527-556.
 7. Havrylenko O., Dergachov K., Pavlikov V., Zhyla S., Shmatko O., Ruzhentsev N., Kuznetsov B. Decision support system based on the ELECTRE method. In *data science and security: proceedings of IDSCS 2022*. 2022;295-304.
 8. Yini L., Zhanjun W. The technology readiness assessment of nuclear power system in fnpp based on the integration of delphi and ahp method. In the proceedings of the international conference on nuclear engineering (ICONE). 2023;30:1307.
 9. Gu J., Kim H., Lim H. Electrified steam cracking for a carbon neutral ethylene production process: techno-economic analysis, life cycle assessment, and analytic hierarchy process. *Energy conversion and management*. 2022;270:116256.
 10. Rospatent in figures and facts 2024. Rospatent: electron. report. 2025. Available at <https://rospatent.gov.ru> (Accessed March 17, 2025).
 11. Amjad M. H. H., Shovon M. S. S., Hasan A.M. Analyzing lean six sigma practices in engineering project management: a comparative analysis. *Innovatech engineering journal*. 2024;1(1):245-255.
 12. Mittal A., Gupta P., Kumar V., Owad Al, Mahlawat S., Singh S. The performance improvement analysis using six sigma MOSAIC methodology: a case study on Indian manufacturing company. *Heliyon*. 2023;9(3):257-259.
 13. Ahmadi S., Quimbayo J.M., Yaah V.B.K., de Oliveira S.B., Ojala S. A critical review on combining adsorption and photocatalysis in composite materials for pharmaceutical removal: pros and cons, scalability, TRL, and sustainability. *Energy nexus*. 2025;100396.
 14. Kar T., Veluswamy H.P. To nip it or let it bloom: life cycle assessment of lab-scale catalysts used in low-TRL CCUS technologies. *Sustainable chemistry for climate action*. 2025;100057.
 15. Yadav K., Singh M. Design and development of a bidirectional DC net meter for vehicle to grid technology at TRL-9 level. *Measurement*. 2023;207:112403.
 16. Guidi G., Goffo G., Violante A.C. Application of the analytic hierarchy process (AHP) method to identify the most suitable approach for managing irradiated graphite. *Nuclear engineering and technology*. 2024;56(11):4820-4825.
 17. Al-Mhdawi M.K.S., Dacre N., Brito M., Baxter D., Xu K., Young C. An agile compliance framework for the european cooperation for space standardization. In *2023 IEEE aerospace conference*. 2023;1-12.
 18. Kim S.M., Salman M., Léonard G. Application of decision support tool (DST) based on analytical hierarchy process for screening of carbon capture technologies. In *GHGT 16-16th international conference on greenhouse gas control technologies*. 2022;20-22.
 19. Muradova S.I., Suleymanov R.D. Assessment of the competitiveness of innovative solutions. In the collection: *The Caspian Sea and global Challenges. Proceedings of the international scientific and practical conference*. 2022;781-785.
 20. Xiaobo P., Liwei Z., Fashu S. *Sposob vozvrata golovnogo obtekatel'ya* [Rocket fairing recovery system and method]. Patent CN, No. 111174646, 2020.
 21. The World Intellectual Property Organization (WIPO). *Patentscope* 2025. Available at: <https://www.wipo.int/en/web/patentscope> (Accessed March 17, 2025).
 22. Kozlovsky L.K., Kozlovsky V.L., Maltsev G.S. *Vertolet dlya montagnih i spasatel'nyh rabot* [Helicopter for installation and rescue work]. Patent RU, no. 146908, 2014.
 23. Grudin S.V., Zakharov V.A., Tsyganov B.P. *Gruzovoi kryk* [Cargo hook]. Patent SU, no. 906895, 1982.
 24. Fedulov S.A. *Ballon visokogo davleniya* [High pressure cylinder]. Patent RU, no. 21640, 2002.
 25. Gnedykh A.M. *Vosdyshniu raketni dvigatel* [Air Rocket Engine]. Patent RU, no. 2138669, 1999.
 26. Shatokhin V.N., Kochergin V.K., Ananyev V.N. *Parachute* [Parachute]. Patent RU, no. 2774854, 2022.

Поступила 24.06.2025; принята к публикации 26.08.2025; опубликована 31.03.2026
Submitted 24/06/2025; revised 26/08/2025; published 31/03/2026

Родионов Никита Вадимович – соискатель ученой степени кандидата технических наук, Самарский национальный исследовательский университет им. С.П. Королева, Самара, Россия.
Email: megarodnik@bk.ru. ORCID 0000-0003-2059-235X

Загидуллин Радмир Салимьянович – кандидат технических наук, старший преподаватель, Самарский национальный исследовательский университет им. С.П. Королева, Самара, Россия.
Email: zagidullin_radmir@mail.ru. ORCID 0000-0002-3175-8573

Nikita V. Rodionov – PhD (Eng.) degree-seeking applicant, Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, Samara, Russia.
Email: megarodnik@bk.ru. ORCID 0000-0003-2059-235X

Radmir S. Zagidullin – PhD (Eng.), Senior Lecturer, Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, Samara, Russia.
Email: zagidullin_radmir@mail.ru. ORCID 0000-0002-3175-857

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 658.512
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-1-116-122



ДОКУМЕНТИРОВАНИЕ ПОТОКОВ ТЕХНОЛОГИЙ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА АВТОКОМПОНЕНТОВ ДЛЯ ПРОСЛЕЖИВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК КАЧЕСТВА

Сафаров Д.Т., Касьянов С.В., Сафарова Л.Р.

Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета,
Набережные Челны, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Технологическая документация единой системы технологической подготовки производства (ЕСТПП) обеспечивает возможность прослеживания качества только на уровне оценки годности партии автокомпонента. Для управления по современным требованиям значения наиболее важных (специальных) характеристик качества необходимо проследить по каждой операции на всех этапах жизненного цикла отдельной единицы автокомпонента – от извлечения исходного вещества из природной среды до подготовки к утилизации материала отработавших деталей. **Используемые методы.** Системный анализ. Процессный подход. **Новизна.** Предложено этапы жизненного цикла детали рассматривать как единый поток технологических процессов, дифференцируемый вплоть до отдельных процессов создания отдельных простейших элементов детали от извлечения исходных компонентов ее материала из природной среды до утилизации после функционирования в составе узлов машины. **Результат.** Разработан универсальный подход к построению карт потоков процессов всех видов технологий с возможностью дифференциации их содержания по иерархическим уровням до приемлемой глубины дифференциации, достаточной для решения той или иной производственной задачи. На верхнем уровне выделяются следующие взаимосвязанные этапы жизненного цикла детали: извлечения исходного вещества из природной среды, изготовления полуфабриката материала для деталей, изготовления детали, включения детали в состав изделия, применения детали в составе изделия, подготовки материала отработавшей детали к утилизации. Каждый из этапов жизненного цикла дифференцируется на технологические маршруты. Технологические маршруты состоят из отдельных операций, которые могут дифференцироваться на переходы формирования единичных показателей качества. **Практическая значимость.** Предложены формы карт потоков процессов, которые удобно использовать для идентификации операций, в которых возможно возникновение наиболее значимых потенциальных дефектов, а также в которых порождаются причины их возникновения (первичные несоответствия специальных характеристик качества).

Ключевые слова: автокомпонент, этапы жизненного цикла, потоки технологий, карты операционных процессов, первичные несоответствия специальных характеристик качества

Работа выполнена за счет гранта, предоставленного Академией наук Республики Татарстан образовательным организациям высшего образования, научным и иным организациям на поддержку планов развития кадрового потенциала в части стимулирования их научных и научно-педагогических работников к защите докторской диссертации и выполнению научно-исследовательских работ (соглашение № 12/2025-ПД-КФУ от 22.12.2025 г.).

© Сафаров Д.Т., Касьянов С.В., Сафарова Л.Р., 2026

Для цитирования

Сафаров Д.Т., Касьянов С.В., Сафарова Л.Р. Документирование потоков технологий жизненного цикла автокомпонентов для прослеживания характеристик качества // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №1. С. 116-122. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-116-122>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOCUMENTING THE TECHNOLOGY FLOWS OF AUTOMOTIVE COMPONENTS LIFE CYCLE TO TRACK QUALITY CHARACTERISTICS

Safarov D.T., Kasyanov S.V., Safarova L.R.

Naberezhnye Chelny Institute (branch) of the Kazan (Volga Region) Federal University, Naberezhnye Chelny, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). Objectives. The technological documentation of the unified system of technological preparation of production (USTPP) provides the ability to track quality only at the level of assessing the suitability of auto components batch. For management according to modern requirements the values of the most important (special) quality characteristics must be tracked for each operation at all stages of the life cycle of an individual unit of an auto component: from the extraction of the initial product from the natural environment to the preparation of the used parts material for disposal. **Methods Applied.** Systems analysis and process approach have been used in the present study. **Originality.** It is proposed to consider the stages of the life cycle of a part as a single flow of technological processes, differentiated up to individual processes of creating individual simplest elements of the part from the extraction of the initial components of its material from the natural environment to disposal after operating as part of machine units. **Result.** A universal approach to constructing process flow maps for all types of technologies has been developed with the ability to differentiate their content by hierarchical levels to an acceptable differentiation depth sufficient to solve a particular production task. The following interrelated stages of the part life cycle are distinguished at the top level: extraction of the initial component from the natural environment, manufacture of a semi-finished product for parts, manufacture of a part, inclusion of a part in the product, use of a part in the product, preparation of the part material for disposal. Each stage of the life cycle is differentiated into process routes. Process routes consist of individual operations that can be differentiated into individual transitions for the formation of individual quality indicators. **Practical Relevance.** Forms of process flow maps have been obtained that are convenient to use for identifying the operations of occurrence of the most significant potential defects, as well as defects in which the reasons for their occurrence are generated (primary discrepancies in special quality characteristics).

Keywords: automotive component, life cycle stages, technology flows, operational process maps, primary discrepancies in special quality characteristics

For citation

Safarov D.T., Kasyanov S.V., Safarova L.R. Documenting the Technology Flows of Automotive Components Life Cycle to Track Quality Characteristics. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 1, pp. 116-122. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-116-122>

Постановка задачи работы

Во времена СССР предприятия-поставщики автокомпонентов (АК) создавались под задачи головного завода. При подготовке производства конструкторам было достаточно задать и документировать стандартизованный комплекс характеристик качества АК и требований к ним. Технологи назначали требования к последовательности производственных операций и условиям их выполнения. Основной задачей производителей было соблюдение технологической дисциплины и выполнение стандартизованных процедур контроля качества технического обслуживания и оснастки.

К сожалению, отсутствие компьютерных программ и электронных баз данных означало высокую трудоемкость создания технологических документов и вынуждало руководителей мириться с недостаточной компетентностью имеющихся специалистов. Поскольку документацию на отдельные виды производственных и вспомогательных техпроцессов составляли специалисты различных служб, содержание ком-

плектов документации на разные виды производственных технологий тщательно выверить и согласовать между собой было затруднительно. Все это не позволяло полностью исключить внутренний брак и препятствовало оперативному устранению причин рекламаций. Но в советское время эти проблемы не влияли ни на цену, ни на объемы поставок.

В настоящее время большинство поставщиков – это узкоспециализированные частные предприятия. Они работают в исключительно жесткой конкурентной среде, не располагая ни достаточными финансовыми ресурсами, ни опытными специалистами. Головные автомобильные заводы требуют от них полного отсутствия брака при строжайшем соблюдении графика поставок. При этом даже разовый отказ заказчика в приемке партии, в которой обнаружился брак, или разовый срыв графика ее поставки приводит к снижению рейтинга поставщика и уменьшает вероятность выигрыша им тендера на поставку на следующий год. Повторное нарушение может привести уже к досрочному расторжению действующего контракта. Кроме того, поставщик может лишиться

дохода от проекта в результате жестких санкций со стороны надзорных органов. Поэтому для поддержания своей конкурентоспособности нынешнему поставщику гораздо более важно в каждом очередном проекте подготовки производства и поставок нового автокомпонента минимизировать риск потери запланированного объема прибыли [1]. Результативность управления в первую очередь определяется наличием адекватных требований и достоверной информации об их выполнении. Достижение этой цели осуществляется путем решения двух групп задач управления:

- прямых – предупреждение значимых потенциальных проблем: недопущение ошибок в документации, дефектов продукции, срывов сроков поставок, а также исключение травмоопасных ситуаций или нарушений экологических требований;

- обратных – результативное и максимально оперативное устранение причин выявленных проблем.

Информация в стандартизованных документах ЕС ТПП предназначена только для обеспечения качества товарного продукта на этапах его эксплуатации и производства. В [2] показано, что именно невозможность прослеживания непрерывных потоков технологий в жизненном цикле автокомпонента (ЖЦ АК) является важнейшей причиной низкой результативности определения причин потенциальных и выявленных дефектов. Иначе говоря, нужна идентификация условий выполнения всех без исключения технологических операций на всех его этапах. Поэтому, чтобы улучшать качество по современным требованиям, в дополнение к стандартным пакетам техдокументации необходимо подготовить следующую информацию:

- Составить карты непрерывных потоков операций в техпроцессах производства АК.

- Сформировать перечень операций, в которых возможно появление дефектов с наиболее значимыми последствиями, а также тех, в которых формируются первичные несоответствия специальных характеристик качества (СХК), способные вызвать такие дефекты.

- В операциях, где формируются СХК, подготовить перечень ключевых контрольных характеристик, наиболее существенно влияющих на значение каждой СХК.

- Обеспечить достоверные результаты измерений каждой СХК в серийном производстве для разработки адекватных планов регулирования ее значений.

Широко известная процедура субъективного составления карт потоков процессов [3, 4] для этого не годится. Чаще всего этим занимаются неспециалисты, так что она не структурирована, практически не увязана с содержанием технологической документации и не может быть надежным источником информации [5]. Ряд авторов пытаются по-своему систематизировать процессы производства для управления качеством. Например, в [6–8] этапы жизненного цикла рассматриваются отдельно от потоков процесса производства. В [9–12] отмечается иерархическая вложенность элементов технологий изготовления дета-

лей, но отсутствует анализ содержания конкретных технологических операций и переходов. В результате в рамках производственного цикла на практике крайне сложно идентифицировать и проследить показатели качества.

Таким образом, для документирования содержания достаточно широкой гаммы технологий требуется теоретически обосновать общую схему моделирования потоков технологий в жизненных циклах изделий.

Этапы цикла использования природных веществ для изготовления и применения деталей машин

Нормативными документами, например [1], определено, что изделие автотехники состоит из автокомпонентов. В самом общем представлении автокомпоненты – это искусственно созданные технические модули. Они предназначены для выполнения функции своего назначения в составе изделия. Базовыми составляющими (простейшими элементами) модуля являются детали – неделимые далее материальные тела. Они состоят из искусственных материалов, обеспечивающих требования к характеристикам деталей. Исходное сырье для их создания можно взять только из природной среды.

Используем в качестве примера классическую деталь машины – зубчатое колесо. В автомобилестроении оно обычно изготавливается из проката малоуглеродистых легированных сталей. Для обеспечения износостойкости поверхностные слои зубьев венца подвергаются химико-термической обработке. Поверхности базовых и рабочих элементов детали должны быть обработаны с высокой точностью.

Полный цикл использования человеком природных веществ для создания материалов, необходимых для изготовления и применения деталей АК, предложено рассматривать состоящим из семи этапов (**рис. 1**).

Первый этап – извлечение из природной среды подходящих исходных субстанций для изготовления нужного материала. В нашем случае это руды тех металлов, которые будут входить в состав нужной марки стали (железа, марганца, хрома, никеля и т.д.). Эти технологии в огромных объемах осуществляются в соответствующих горнодобывающих производствах.

Напрямую из руды эффективно выплавить требуемый состав стали невозможно. Поэтому на **втором этапе** из добытых рудных субстанций в обогащательных производствах предварительно получают полуфабрикаты формирования химического состава будущих материалов деталей (железорудные окатыши, гранулы феррохрома, ферромарганца и т.д.).

Технологии добычи и обогащения природного сырья осуществляются в гигантских масштабах. Они оказывают колоссальное воздействие на окружающую природную среду и жизнедеятельность людей. Их приходится дополнять технологиями, уменьшающими степень этого воздействия.



Рис. 1. Схема цикла использования природных веществ для изготовления и применения деталей машин
 Fig. 1. Cycle scheme of using natural materials for the production and use of machine parts

На **третьем этапе** в металлургических производствах осуществляется сначала выплавка марок сталей заданного состава, а затем изготавливается широкий ассортимент стального проката. Теперь бывшие природные вещества входят в объем этих искусственных материалов.

Изготовителю деталей (зубчатых колес) для решения своих узкоспециальных задач анализировать содержание технологий на первых трех этапах нет нужды. Ему важно только убедиться, что характеристики приобретаемой партии проката нужной марки и сортамента соответствуют требованиям стандарта или ТУ. Он рассматривает жизненный цикл самой детали с начала ее изготовления (только с **четвертого этапа** использования природных веществ). В кузнечном, термическом, механообрабатывающем производствах поставщик АК закупленному материалу придает заданную форму, структуру и свойства, а все конструктивные элементы будущей детали получают полный комплекс показателей точности.

На **пятом этапе** использования природных веществ (на втором этапе жизненного цикла детали) деталь в комплекте с другими деталями сначала встраивают с требуемой точностью в состав первичной сборочной единицы – узла (выполняют его сборку). С первой операции сборки начинается жизненный цикл узла. Собранные узлы с требуемой точностью встраивают в состав сборочной единицы смежного вышележащего уровня – агрегата, который предназначен для выполнения набора законченных функций изделия (автомобиля). Наконец, агрегат встраивают в состав изделия. Интегральная окончательная оценка качества всех автокомпонентов (деталей, узлов и агрегатов) производится в ходе испытаний изделия.

Итак, от извлечения природных веществ необходимо пять этапов их преобразований, чтобы деталь автокомпонента была готова к выполнению заданной для нее функции. Только на **шестом этапе** деталь становится постоянным элементом изделия и обеспечивает выполнение им транспортных заданий (например, перевозку грузов по заданным маршрутам). В течение срока эксплуатации эти задания многократно повторяются. Соответственно, многократно повторяются и те операции, в которых задействована конкретная деталь. В результате изменяются свойства ее материала, нарастает износ, накапливаются деформации и локальные повреждения ее элементов. В итоге качество выполняемых деталью функций снижается, ухудшается и качество выполнения функций изделием. На интенсивность этих процессов влияют режимы работы и условия хранения изделия, а также качество техобслуживания агрегата (в первую очередь смазка и регулировка).

Функциональный потенциал детали исчерпан, когда значения наиболее важных характеристик ее качества выходят за установленные пределы. Остается реализовать последний – **седьмой этап** цикла использования природных веществ: подготовку материала детали к утилизации (повторному использованию). Эта технология осуществляется в порядке, обратном изготовлению изделия: сначала разборка его на агрегаты, затем на узлы и детали. Далее выполняются операции по подготовке к нанесению на рабочую поверхность слоя нового металла взамен изношенного или к переплавке для изготовления материала с целью производства других деталей.

Предложенная систематизация всех этапов применения природных веществ не просто позволяет по единой схеме подходить к выбору или созданию

наиболее подходящих вариантов материалов, данный подход нацелен на минимизацию воздействия человеком на природную среду путем наиболее рационального использования добытого сырья с учетом возможностей повторного применения отработанных искусственных материалов.

Структурирование потоков технологий на этапах производства АК

Решающий этап создания машин высокого качества – изготовление деталей. Оно осуществляется в рамках проектов подготовки производства и выпуска изделий [1]. На первых этапах этого проекта конструкторы должны назначить все характеристики качества деталей сопряжений, узлов, агрегатов и изделий, а также адекватные требования к ним. Чем более жесткие требования будут заданы, тем более жесткие ограничения на условия выполнения производственных операций будут далее задавать технологии, а в ходе серийного производства придется строже поддерживать достаточную стабильность этих условий.

В основу моделирования содержания производственных технологий положено базовое определение: технология – это непрерывный поток структурно организованных процессов изготовления, хранения и применения по назначению изделия, обеспечивающий его требуемое качество в каждом из этих процессов при заданных ограничениях со стороны производственной системы [2].

Содержание любых технологий предложено моделировать в универсальной иерархической структуре, последовательно дифференцируя крупные элементы на все более мелкие [4]. В ходе четвертого и пятого этапов ЖЦ АК надо в дополнение к стандартной технической документации сначала выстроить и документировать непрерывный поток производственных технологических маршрутов. Для случая изготовления зубчатого колеса схема этого потока представлена на **рис. 2**. Чтобы проследить факторы возможных потерь уже созданного качества (повреждения при падениях, коррозию) и рисков утраты продукции, в состав потока приходится включать документированные маршруты транспортировки и хранения полуфабрикатов.

Структурными элементами маршрута являются технологические операции, выполняемые на отдельных рабочих местах. Пример фрагмента потока операций приведен на **рис. 3**.

Согласно ЕС ТПП, на этапе изготовления деталей содержание маршрута оформляется маршрутной технологической картой. В настоящее время технологи стараются ограничиться изложением требований к условиям выполнения только производственных операций. Но для прослеживания качества необходимо документирование полного их набора, включая транспортировку операции между производственными рабочими местами, операции хранения и контроля. Карту потоков операций следует включить в состав комплекта технологической документации как приложение к маршрутной карте.

Чтобы управлять значениями СХК, содержание операций приходится рассматривать подробно в элементах нижележащих структурных уровней операции: установов, позиций, переходов, а также рабочих ходов. Это позволяет выявлять практически все значимые причины несоответствия СХК:

- погрешности оборудования и оснастки;
- значения характеристик наладки, включая погрешности базирования;
- условия обработки в каждом отдельном процессе (действующие силы, температуры, интенсивность износа инструментов).

Заключение

Предупредить потенциальные дефекты и устранить причины уже выявленных дефектов АК можно только, если формализовать и представить в виде совокупности непрерывных потоков технологий полное содержание жизненного цикла автомобиля в целом, с выделением жизненных циклов всех входящих в его состав агрегатов, узлов и деталей. Но при этом состав комплектов технической документации существенно расширяется, поэтому реализация предложенных мероприятий ставит задачу скорейшего создания российского программного обеспечения для управления проектами подготовки производства и выпуска новых компонентов.

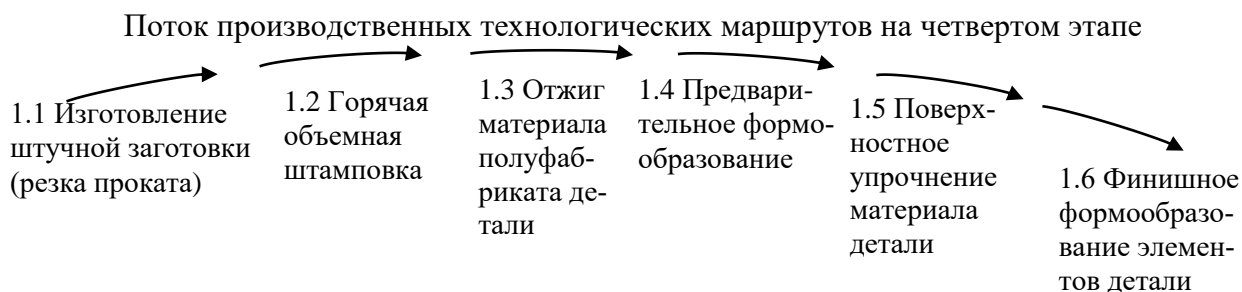


Рис. 2. Схема технологических маршрутов изготовления детали

Fig. 2. Scheme of technological routes for manufacturing a part

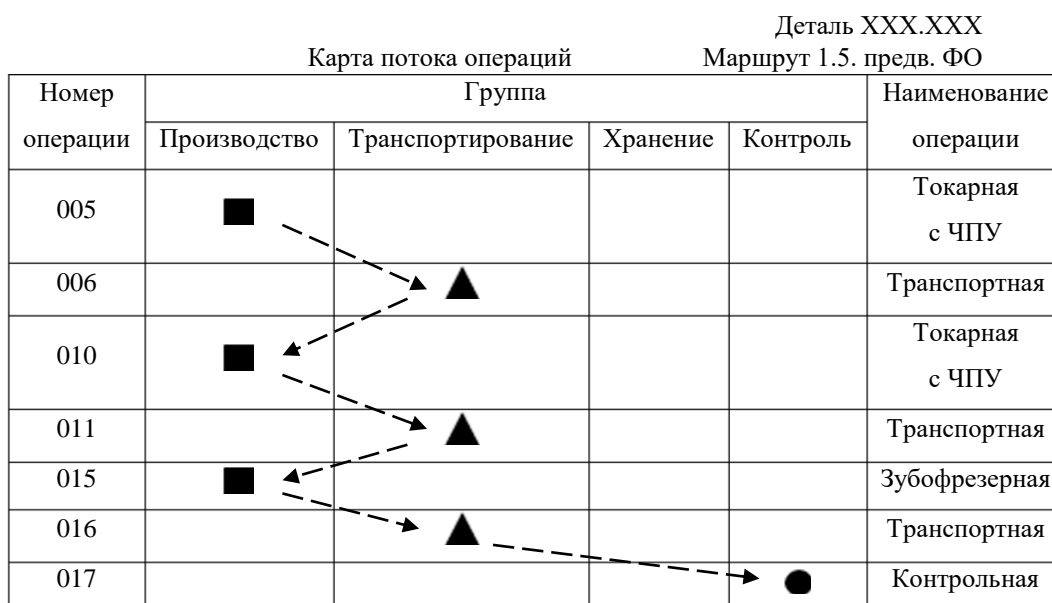


Рис. 3. Фрагмент карты потока операций в маршруте предварительного формообразования

Fig. 3. Fragment of the flow chart of operations in the preliminary shaping route

Список источников

1. IATF 16949:2016. Системы менеджмента качества. Особые требования к применению стандарта ISO 9001:2015 для автомобильного производства и соответствующих сервисных организаций. М.: Стандартинформ, 2015. 23 с.
2. Касьянов С.В., Карлова Т.В. Жизненный цикл деталей машин как непрерывный поток технологий // Вестник брянского ГТУ. 2019. №7 (80). С. 18-22.
3. ГОСТ Р 57524-2017. Бережливое производство. Поток создания ценностей. М.: Стандартинформ, 2017. 18 с.
4. ГОСТ Р 53791-2023. Ресурсосбережение. Стадии жизненного цикла изделий производственно-технического назначения. Общие положения. М.: Российский институт стандартизации, 2023. 12 с.
5. Касьянов С.В., Биктимирова Р.Ф. Технологический переход как ключевой процесс управления качеством продукции в соответствии с ИСО/ТС 16949-09 // Автомобильная промышленность. 2014. №3. С. 27-29.
6. Денисова Я.В. Управление качеством процессов производства продукции машиностроения в сети // Омский научный вестник. 2024. № 1(189). С. 28-34.
7. Георгиевский А.Д., Черемухина Ю.Ю. Разработка системы управления качеством на этапах жизненного цикла радиоэлектронного комплекса // Наука и бизнес: пути развития. 2024. № 5(155). С. 66-69.
8. Рыбкина О.В. Классификация рисков на предрыночных стадиях жизненного цикла наукоемкой продукции // Организатор производства. 2021. Т. 29, № 4. С. 165-176.
9. Белов М.В., Новиков Д.А. Управление жизненными циклами организационно-технических систем. М.: Лепанд, 2020. 384 с.
10. Яковлева М.В. Разработка модели управления испытаниями в целях минимизации риска потери качества промышленной продукции на разных стадиях жизненного цикла промышленной продукции // Экономика, предпринимательство и право. 2022. Т. 12, № 2. С. 609-626.
11. Терехов М.А. Управление жизненным циклом продукции машиностроения на этапе производства // Синергия наук. 2022. № 72. С. 50-58.
12. Обзор инструментов процессного управления качеством при проектировании новых конструкций машиностроительной продукции на примере ведущих автопроизводителей / В.Н. Козловский, И.А. Беляева, О.И. Антипова, А.В. Гусев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 8. С. 39-43.

References

1. IATF 16949:2016 Quality management systems. Specific requirements for the application of ISO 9001:2015 to automotive manufacturing and related service organizations. Moscow: Standartinform, 2015, 23 p. (In Russ.)
2. Kasyanov S.V., Karlova T.V. Life cycle of machine parts as a continuous flow of technologies. *Vestnik bryanskogo GTU* [Bulletin of Bryansk STU]. 2019;(7(80)):18-22. (In Russ.)
3. State standard GOST R 57524-2017 Lean manufacturing. Value creation flow. Moscow: Standartinform, 18 p. (In Russ.)
4. State standard GOST R 53791-2023 Resource saving. Life cycle stages of industrial and technical products. General provisions. Moscow: Russian Institute of Standardization, 2023, 12 p. (In Russ.)
5. Kasyanov S.V., Biktimirova R.F. Technological transition as a key process of product quality management in accordance with ISO/TS 16949-09. *Avtomobilnaya promyshlennost* [Automotive Industry]. 2014;(3):27-29. (In Russ.)
6. Denisova Ya.V. Quality management of manufacturing processes of mechanical engineering products in the net-

- work. *Omskiy nauchniy vestnik* [Omsk Scientific Bulletin]. 2024;(1(189)):28-34. (In Russ.)
7. Georgievskiy A.D. Cheremukhina Yu.Yu. Development of a quality management system at the stages of the life cycle of a radio-electronic complex. *Nauka i biznes: puti razvitiya* [Science and business: development paths]. 2024;(5(155)):66-69. (In Russ.)
 8. Rybkina O.V. Classification of risks at pre-market stages of the life cycle of high-tech products. *Organizator proizvodstva* [Production organizer]. 2021;29(4):165-176. (In Russ.)
 9. Belov M.V., Novikov D.A. *Upravlenie zhiznennymi tsiklami organizatsionno-tekhnicheskikh sistem* [Management of life cycles of organizational and technical systems]. Moscow: Lenand, 2020, 384 p. (In Russ.)
 10. Yakovleva M.V. Development of a test management model in order to minimize the risk of loss of industrial product quality at different stages of the life cycle of industrial products. *Ekonomika, predprinimatelstvo i pravo* [Economy, entrepreneurship and law]. 2022;12(2):609-626. (In Russ.)
 11. Terekhov M.A. Life cycle management of mechanical engineering products at the production stage. *Sinergiya nauk* [Synergy of Sciences]. 2022;(72):50-58. (In Russ.)
 12. Kozlovsky V.N., Belyaeva I.A., Antipova O.I., Gusev A.V. Review of process quality management tools in making new designs of mechanical engineering products using leading automakers as examples. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Tula State University. Technical Sciences]. 2024;(8):39-43. (In Russ.)

Поступила 26.06.2025; принята к публикации 19.01.2026; опубликована 31.03.2026
Submitted 26/06/2025; revised 19/06/2026; published 31/03/2026

Сафаров Дамир Тамасович – кандидат технических наук, доцент,
Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета, Россия.
Email: safarov-dt@mail.ru. ORCID 0000-0002-8297-4524

Касьянов Станислав Владимирович – кандидат технических наук, доцент,
Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета, Россия.
Email: kpfu.ktomp@yandex.ru

Сафарова Лейля Ринатовна – аспирант,
Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета, Россия.
Email: leila-r.85@mail.ru

Damir T. Safarov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Naberezhnye Chelny Institute (branch) of Kazan (Volga Region) Federal University, Russia.
Email: safarov-dt@mail.ru. ORCID 0000-0002-8297-4524

Stanislav V. Kasyanov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Naberezhnye Chelny Institute (branch) of Kazan (Volga Region) Federal University, Russia.
Email: kpfu.ktomp@yandex.ru

Leila R. Safarova – Postgraduate Student,
Naberezhnye Chelny Institute (branch) of Kazan (Volga Region) Federal University, Russia.
Email: leila-r.85@mail.ru



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 620.197.3:531.7
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-1-123-132

ФОТОМЕТРИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНГИБИТОРА КОРРОЗИИ: РОЛЬ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ В ОБЕСПЕЧЕНИИ КАЧЕСТВА АНАЛИТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Шарафиева Р.Р., Денисова Я.В., Сопин В.Ф.

Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия

Аннотация. Актуальность работы. Надежность и долговечность оборудования в сфере нефтегазового машиностроения, имеющей стратегическое значение для экономики России и нефтегазовой отрасли, определяется эффективной защитой от коррозии и ролью ингибиторов. Эффективность ингибирования, в свою очередь, во многом определяется точностью аналитического контроля концентрации ингибитора, осуществляемого, в частности, фотометрическим методом. Однако достоверность результатов подвержена неопределенности измерений, обусловленной различными факторами. В соответствии с ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 оценка и учет неопределенности обязательны для испытательных лабораторий, проводящих аналитический контроль. Актуальность работы заключается в предоставлении практических подходов к оценке неопределенности при фотометрическом определении ингибиторов коррозии для обеспечения соответствия нормативным требованиям и повышения качества аналитических результатов. **Цель работы.** Оценивание неопределенности измерения при фотометрическом определении ингибитора коррозии. **Используемые методы.** Для оценки неопределенности использовался метод моделирования. Составлена математическая модель измерения, описывающая взаимосвязь между измеряемой величиной и входными параметрами. Для каждой входной величины были определены значения и приписаны соответствующие законы распределения. **Новизна.** Особенность работы заключается в комплексном анализе процедуры фотометрического определения с идентификацией источников неопределенности на всех этапах измерения с использованием причинно-следственной диаграммы Исикавы. **Результаты.** Идентифицированы и количественно оценены источники неопределенности: по типу А – на основе статистики наблюдений; по типу В – на основе оценки влияния отдельных факторов. Для каждого этапа измерения были рассчитаны относительные стандартные неопределенности. Выведено уравнение для вычисления относительной суммарной стандартной неопределенности. Рассчитана относительная расширенная неопределенность. Для систематизации и наглядного представления результатов был сформирован бюджет неопределенности. **Практическая значимость.** Внедрение результатов работы в практику аналитического контроля ингибиторов в сфере нефтегазового машиностроения и нефтегазовой отрасли позволит обеспечить соответствие требованиям ГОСТ ISO/IEC 17025-2019, повысить достоверность измерений и обеспечить их метрологическое обоснование.

Ключевые слова: долговечность, коррозия, эффективность ингибирования, аналитический контроль, достоверность результатов, причинно-следственная диаграмма, неопределенность, бюджет неопределенности

© Шарафиева Р.Р., Денисова Я.В., Сопин В.Ф., 2026

Для цитирования

Шарафиева Р.Р., Денисова Я.В., Сопин В.Ф. Фотометрическое определение ингибитора коррозии: роль неопределенности измерений в обеспечении качества аналитических исследований и их результатов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №1. С. 123-132. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-123-132>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

PHOTOMETRIC DETERMINATION OF A CORROSION INHIBITOR: THE ROLE OF MEASUREMENT UNCERTAINTY IN ENSURING THE QUALITY OF ANALYTICAL STUDIES AND THEIR RESULTS

Sharafieva R.R., Denisova Ya.V., Sopin V.F.

Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

Abstract. Relevance. The reliability and durability of equipment in the field of oil and gas engineering, which is of strategic importance for the Russian economy and the oil and gas industry, is determined by effective corrosion protection and the role of inhibitors. The effectiveness of inhibition, in turn, is largely determined by the accuracy of analytical control of the inhibitor concentration, which is carried out, in particular, by the photometric method. However, the reliability of the results is subject to measurement uncertainty caused by various factors. In accordance with GOST ISO/IEC 17025-2019, the assessment and accounting of uncertainty are mandatory for testing laboratories conducting analytical control. The relevance of this work lies in providing practical approaches to assessing uncertainty in the photometric determination of corrosion inhibitors to ensure compliance with regulatory requirements and improve the quality of analytical results. **Objectives.** The study is aimed at estimating the measurement uncertainty in the photometric determination of a corrosion inhibitor. **Methods Applied.** A modeling approach has been used to estimate the uncertainty. A mathematical measurement model has been developed, describing the relationship between the measured value and the input parameters. Values have been determined for each input value, and corresponding distribution laws have been assigned. **Originality.** The peculiarity of this work is the comprehensive analysis of the photometric determination procedure, which includes the identification of sources of uncertainty at all stages of measurement using the Ishikawa cause-and-effect diagram. **Result.** The uncertainty sources have been identified and quantified: type A based on observation statistics, and type B based on the assessment of the influence of individual factors. The relative standard uncertainties have been calculated for each measurement stage. An equation for calculating the relative total standard uncertainty has been generated. The relative extended uncertainty has been calculated. The uncertainty budget has been formed to systematize and visualize the results. **Practical Relevance.** The implementation of the study results into the practice of analytical control of inhibitors in the field of oil and gas engineering and the oil and gas industry will ensure compliance with the requirements of GOST ISO/IEC 17025-2019, increase the reliability of measurements, and provide their metrological justification.

Keywords: durability, corrosion, inhibition efficiency, analytical control, reliability of results, cause-and-effect diagram, uncertainty, uncertainty budget

For citation

Sharafieva R.R., Denisova Ya.V., Sopin V.F. Photometric Determination of a Corrosion Inhibitor: the Role of Measurement Uncertainty in Ensuring the Quality of Analytical Studies and Their Results. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 1, pp. 123-132. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-123-132>

Введение

Эффективная защита от коррозии является ключевым фактором обеспечения безопасной и надежной эксплуатации нефтегазового оборудования в сфере нефтегазового машиностроения и нефтегазовой отрасли. Коррозионные процессы негативно воздействуют на комплекс объектов, задействованных в добыче, подготовке и транспортировке углеводородов. Согласно статистическим данным, коррозия внутренних и наружных металлических поверхностей является одной из основных причин аварий (до 80 %) и отказов нефтегазового оборудования [1-3].

Химическая защита, также известная как ингибиторная, представляет собой широко распространенный метод предотвращения коррозии нефтегазового оборудования [4-6]. Многообразии факторов, влияющих на коррозию в сложных углеводородных средах

(температура, давление, компонентный состав сред, наличие CO₂, H₂S, механических примесей, содержание воды и других агрессивных компонентов), определяет отсутствие универсального ингибитора и обуславливает широкий ассортимент реагентов, различающихся по составу и механизму действия [7-9].

Эффективность применения ингибиторов коррозии напрямую зависит от их качества, что обуславливает необходимость акцентирования внимания на контроле качества как самих ингибиторов, так и их содержания в технологических средах. Под качеством ингибитора коррозии понимается комплекс взаимосвязанных свойств, обеспечивающих его эффективность и безопасность применения, и способность сохранять эти свойства на протяжении установленного срока эксплуатации [4].

На входном контроле, как правило, осуществляется лабораторная оценка качества ингибиторов по ряду физико-химических показателей, определяющих технологические и противокоррозионные свойства товарной формы продукта. К таким показателям относятся: массовая доля активного вещества, плотность, кинематическая вязкость, температура застывания и др. [4, 10]. Данные параметры позволяют оценить соответствие ингибитора нормативным требованиям и его пригодность для использования в конкретных условиях.

Периодический контроль содержания ингибитора в технологических средах осуществляется также лабораторным путем в рамках реализации программ коррозионного мониторинга. Практическая эффективность применения ингибиторов коррозии напрямую зависит от достоверности и своевременности результатов аналитического контроля за их концентрацией в технологических средах. Нарушение оптимальной концентрации может приводить к снижению защитного эффекта и, как следствие, к активизации коррозионных процессов. Таким образом, эффективная противокоррозионная защита в нефтегазовых системах неразрывно связана с комплексной системой химико-аналитического контроля, включающей входной контроль качества ингибиторов и мониторинг их концентрации в технологических средах. Аналитический контроль содержания ингибитора коррозии является ключевым элементом коррозионного мониторинга, обеспечивающим основу для принятия обоснованных решений о необходимости корректирующих мероприятий. Учитывая прямую зависимость эффективности защиты от точности аналитических данных, важной задачей становится оценка точности методики определения концентрации ингибитора и, как следствие, достоверности получаемых результатов испытаний.

В соответствии с положениями раздела 7.6 стандарта [11], испытательные лаборатории обязаны оценивать и указывать неопределенность измерений в отчетах об испытаниях, что является необходимым условием подтверждения компетентности. Методологической основой для оценки неопределенности являются стандарт [12] и Руководство по выражению неопределенности измерения (GUM) [13], которые предлагают общий методологический подход к данной задаче. Однако практическое применение указанных руководств сопряжено с трудностями. Выбор составляющих неопределенности и построения адекватной математической модели, отражающей их вклад и взаимозависимости, в сочетании с недостаточной распространенностью компетенций в области теории вероятностей, математического моделирования и статистики, делают эту задачу непростой для многих испытательных лабораторий [14].

Несмотря на отмеченные сложности, концепция неопределенности измерений все активнее внедряется в практику различных отраслей промышленности.

В частности, она внедрена в газовой отрасли, что подтверждается межгосударственными стандартами [15, 16], регламентирующими методы анализа природного газа. Кроме того, активно осуществляется внедрение оценки неопределенности измерений в области контроля качества пищевой продукции [14, 17, 18], клинических лабораторных исследований [19-22], а также в процессе определения физико-механических характеристик материалов [23, 24] и при поверке и калибровке средств измерений [25-27].

В условиях возрастающей значимости концепции неопределенности измерений и в строгом соответствии с требованиями стандарта [11] становится необходимым внедрение оценки неопределенности в процессы контроля нефтепромысловых реагентов. В частности, это касается нормативной базы, регламентирующей методы испытаний ингибиторов коррозии и других химических реагентов, применяемых в нефтегазовой отрасли. Это позволит повысить точность и достоверность аналитических результатов, что является ключевым фактором для обеспечения стабильного и безопасного функционирования технологического оборудования. Более того, метрологически корректные аналитические данные, получаемые с учетом неопределенности измерений, обеспечивают принятие обоснованных управленческих решений, способствующих минимизации рисков аварий и снижению эксплуатационных затрат.

Целью настоящей работы является оценка неопределенности измерения при фотометрическом определении ингибитора коррозии. Реализация поставленной цели направлена на формирование методологических подходов, способствующих повышению качества аналитических исследований и обеспечению соответствия требованиям международных и национальных стандартов в области метрологического обеспечения и контроля качества.

Анализ точности фотометрического определения

Фотометрическое определение ингибитора коррозии, основанное на экстрагировании комплекса ингибитора с индикатором метиловым оранжевым, представляет собой широко используемый метод количественного анализа. Детальное описание данной методики изложено в стандарте [28] и подробно представлено в научной литературе [4], а также в технических условиях, разработанных производителями ингибиторов. Однако регламентирующие документы не содержат информации о неопределенности измерений, ограничиваясь указанием показателя точности в виде границы погрешности при доверительной вероятности 0,95. При этом наблюдается значительное расхождение в оценке данного показателя.

В стандарте [28] для различных технологических сред приводится значение 9,7-9,8 отн.%, в то время как в научной литературе [4] указывается погрешность определения, не превышающая 20 отн.%. Данное расхождение также подчеркивает необходимость

уточнения характеристик точности фотометрического определения.

Методы исследования

Для оценки неопределенности фотометрического определения применен метод моделирования (модельный подход) согласно Руководству [13], который включает выявление источников неопределенности, построение модели измерения, приписывание законов распределения входным величинам, расчет стандартных и последующих суммарной и расширенной неопределенностей.

Исследование источников неопределенности проводили аналитически. Стандартные неопределенности оценивались двумя способами. Неопределенности по типу А рассчитывались на основании статистической обработки результатов серий измерений, что позволяло оценить вклад случайных факторов. Оценка неопределенностей по типу В, обусловленных систематическими факторами и не поддающихся непосредственной статистической обработке, проводилась на основе априорной информации из паспортов

средств измерений, сопроводительной документации на лабораторную посуду и реактивы и т.д. Результаты количественной оценки источников неопределенности по типу В подробно представлены в первой части данного исследования, опубликованной в работе [29].

Результаты исследования и их обсуждение

С целью идентификации источников неопределенности, сопутствующих фотометрическому определению ингибитора коррозии, был проведен комплексный анализ применяемой методики. В качестве первого этапа анализа была разработана структурная схема процесса определения содержания ингибитора фотометрическим методом (рис. 1), которая позволяет наглядно представить последовательность этапов анализа и взаимосвязи между ними.

Для дальнейшего анализа и визуализации причинно-следственных связей между источниками неопределенности и конечным результатом измерения, а также для систематизированного анализа этих источников была построена и использована диаграмма Исикавы (рис. 2).

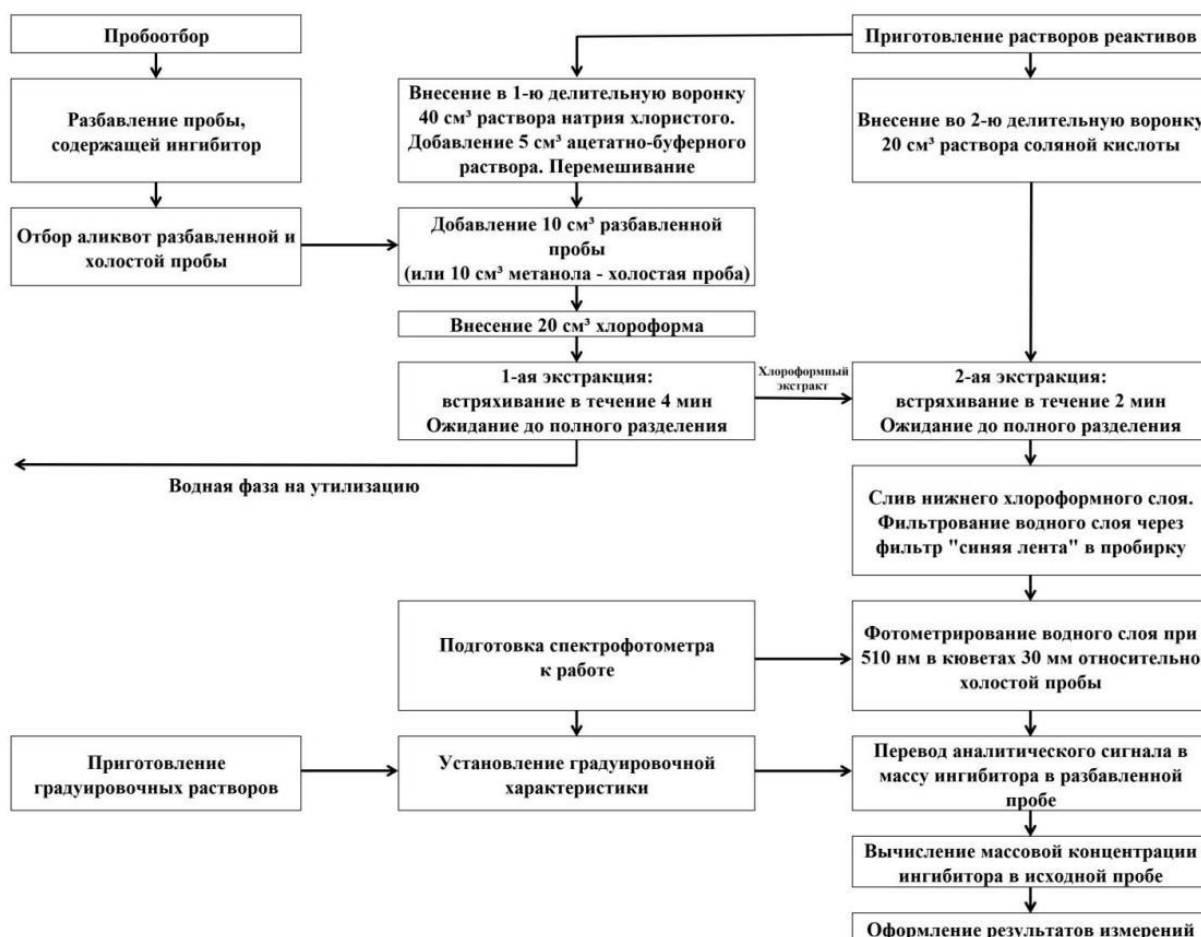


Рис. 1. Последовательность действий при определении ингибитора коррозии фотометрическим методом
Fig. 1. Sequence of actions when determining a corrosion inhibitor by the photometric method

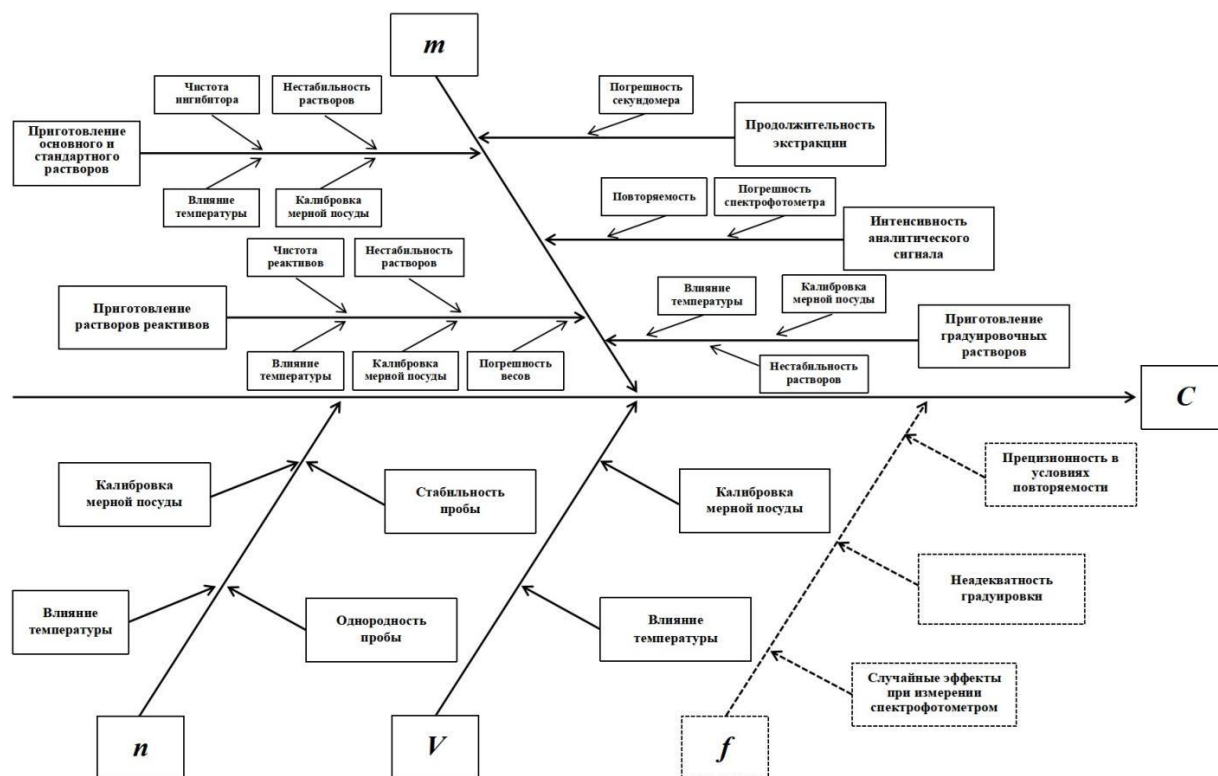


Рис. 2. Диаграмма «причина-следствие» фотометрического определения ингибитора коррозии
 Fig. 2. Cause-and-effect diagram for photometric determination of a corrosion inhibitor

Диаграмма Исикавы, имеющая структуру, аналогичную «рыбьему скелету», отображает процесс фотометрического определения ингибитора, в котором основная горизонтальная линия (представляющая «рыбий хребет») соответствует измеряемой величине – массовой концентрации. Массовая концентрация ингибитора (C , мг/дм³), определяемая формулой (1), зависит от массы ингибитора, определенной по градуировочной характеристике (m , мг), степени разбавления исходной пробы (n) и объема разбавленной пробы (V , см³). Данные параметры являются входными переменными, которые на диаграмме Исикавы представлены сплошными стрелками, сходящимися к основной линии (аналогично «большим костям»).

$$C = \frac{1000 \cdot m \cdot n}{V} \quad (1)$$

Источники неопределенности, влияющие на каждую из входных переменных, представлены дополнительными стрелками («средние» и «мелкие кости»), направленными к соответствующим переменным. Дополнительно штриховой стрелкой на диаграмме обозначены случайные факторы (f), не учтенные в формуле (1), но вносящие вклад в неопределенность при определении ингибитора. К таким факторам относятся: 1) разброс результатов измерений ингибитора коррозии в условиях повторяемости; 2) возможная неадекватность градуировки, вызванная мешающими компонентами в пробе, которые могут быть ошибоч-

но определены как ингибитор коррозии; 3) возможная нестабильность спектрофотометра. Таким образом, диаграмма, изображенная на рис. 2, находится в соответствии с полным уравнением измерений, представленным формулой

$$C = \frac{1000 \cdot m \cdot n}{V} \cdot f \quad (2)$$

На основании анализа измерительной процедуры (см. рис. 1, 2) и с учетом полного уравнения (2), включающего все идентифицированные факторы, в том числе случайные (f), были исключены источники неопределенности, вклад которых признан незначительным по сравнению с влиянием других факторов. Для дальнейшего расчета были выделены следующие основные источники неопределенности при фотометрическом определении ингибитора:

1. Неопределенности, связанные с приготовлением растворов и пробоподготовкой, были оценены по типу В [29]. Стандартные неопределенности определялись в относительных единицах с использованием формул (3) и (4) в зависимости от типа распределения случайной величины (прямоугольного или треугольного соответственно). При этом значение параметра a задавалось интервалом, в котором находилось оцененное значение, на основе информации из паспортов средств измерений, сопроводительной документации на лабораторную посуду, реактивы и других источников.

$$u_{x_i}^{\text{отн}} = \frac{a \cdot 100}{\sqrt{3}}. \quad (3)$$

$$u_{x_i}^{\text{отн}} = \frac{a \cdot 100}{\sqrt{6}}. \quad (4)$$

Относительные суммарные неопределенности $u^{\text{отн}}$, %, были вычислены с использованием метода квадратичного суммирования стандартных неопределенностей и последующего извлечения квадратного корня.

2. Неопределенность, обусловленная измерением по градуировочной характеристике. Влияние на точность определения концентрации ингибитора оказывает неопределенность, возникающая при построении градуировочной кривой методом наименьших квадратов. Оценка данной стандартной неопределенности осуществлялась с учетом положений [30] согласно формулам (5)-(7).

$$u_m = \frac{S}{b} \sqrt{\frac{1}{N} + \frac{1}{J} + \frac{(m - \bar{m})^2}{\sum_{j=1}^J (m_j - \bar{m})^2}}, \quad (5)$$

где b – угловой коэффициент градуировочной характеристики, рассчитанный по методу наименьших квадратов в соответствии с Р 1323565.2.002-2022 [31]; N – число измерений m при анализе рабочей пробы; J – общее число замеров сигнала при построении градуировочной характеристики; j – индекс, соответствующий номеру измерения при градуировке; m – масса ингибитора, определенная по градуировочной характеристике, мг; m_j – значение массы ингибитора в градуировочных растворах, мг; \bar{m} – среднее значение массы ингибитора в градуировочных растворах, мг.

$$\bar{m} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{n}, \quad (6)$$

где n – число градуировочных растворов; i – индекс, соответствующий номеру градуировочного раствора.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^J (A_j - (b_0 + b \cdot m_j))^2}{J - 2}}, \quad (7)$$

где A_j – j -е значение сигнала от градуировочного раствора; b_0 – свободный член градуировочной характеристики, рассчитанный по методу наименьших квадратов.

Относительную стандартную неопределенность, связанную с использованием многоточечной градуировочной характеристики $u_{\text{гх}}^{\text{отн}}$, %, определяли по формуле

$$u_{\text{гх}}^{\text{отн}} = \frac{100 \cdot u_m}{m}. \quad (8)$$

3. Неопределенность, связанная с повторяемостью измерений (влиянием случайных факторов),

проводилась на основе расчета среднеквадратического отклонения (СКО) результатов измерений. Относительная стандартная неопределенность, обусловленная повторяемостью, определялась по формуле

$$u_{\text{повт}}^{\text{отн}} = \frac{100 \cdot u_{\text{повт}}}{\bar{C}} = \frac{100}{\bar{C}} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (C_i - \bar{C})^2}{k \cdot (k - 1)}}, \quad (9)$$

где C_i – единичное значение концентрации ингибитора, мг/дм³; \bar{C} – среднее значение результатов измерений, мг/дм³; k – количество проведенных измерений.

Выявленные источники неопределенности при определении ингибитора фотометрическим методом и результаты их расчета представлены в **таблице**. В конце таблицы представлены значения относительной суммарной стандартной неопределенности, а также результаты расчета и принятые значения относительной расширенной неопределенности. Относительная суммарная неопределенность $u_c^{\text{отн}}$, %, была рассчитана путем суммирования всех стандартных неопределенностей по типу А ($u_A^{\text{отн}}$, %) и по типу В ($u_B^{\text{отн}}$, %), представленных в относительных единицах, согласно формулам

$$u_c^{\text{отн}} = \sqrt{(u_A^{\text{отн}})^2 + (u_B^{\text{отн}})^2}; \quad (10)$$

$$u_c^{\text{отн}} = \sqrt{\begin{aligned} &(u_{c(\text{бф.р})}^{\text{отн}})^2 + (u_{c(\text{NaCl})}^{\text{отн}})^2 + (u_{c(\text{HCl})}^{\text{отн}})^2 + \\ &+(u_{c(\text{осн.р})}^{\text{отн}})^2 + (u_{c(\text{ст.р})}^{\text{отн}})^2 + (u_{c(\text{гп.р})}^{\text{отн}})^2 + (u_{c(\text{разб})}^{\text{отн}})^2 + \\ &+(u_{c(\text{Vпр})}^{\text{отн}})^2 + (u_{c(\text{подгр})}^{\text{отн}})^2 + (u_{\text{гх}}^{\text{отн}})^2 + (u_{\text{повт}}^{\text{отн}})^2 \end{aligned}}. \quad (11)$$

Относительная расширенная неопределенность $U^{\text{отн}}$, %, вычислялась как произведение относительной суммарной стандартной неопределенности на коэффициент охвата $k = 2$ (при уровне доверия 0,95%) по формуле

$$U^{\text{отн}} = k \cdot u_c^{\text{отн}}. \quad (12)$$

Заключение

В рамках данной работы проведена оценка неопределенности измерений при фотометрическом определении ингибитора коррозии. Идентифицированы основные источники неопределенности, выполнен расчет стандартных, суммарной и расширенной неопределенностей, выраженных в относительных единицах. Результатом анализа явилась относительная расширенная неопределенность измерений, составившая 23%. Следует отметить, что представленный бюджет неопределенности не является «исчерпывающим» и может быть пересмотрен в дальнейшем с целью включения дополнительных источников неопределенности, таких как разброс результатов анализа в условиях воспроизводимости, нестабильность пробы и растворов ингибитора, а также особенности пробоотбора и др.

Таблица. Бюджет неопределенности измерений
Table. Measurement uncertainty budget

| Обозначение | Источник неопределенности | Оценка неопределенности типа А/В | Значение относительной стандартной неопределенности, % |
|------------------------------------|--|----------------------------------|--|
| $u_{c(\text{буф.р})}^{\text{отн}}$ | Приготовление ацетатно-буферного раствора | В | 0,65 |
| $u_{c(\text{NaCl})}^{\text{отн}}$ | Приготовление раствора натрия хлористого | В | 0,18 |
| $u_{c(\text{HCl})}^{\text{отн}}$ | Приготовление раствора соляной кислоты | В | 0,58 |
| $u_{c(\text{осн.р})}^{\text{отн}}$ | Приготовление основного раствора | В | 4,7 |
| $u_{c(\text{ст.р})}^{\text{отн}}$ | Приготовление стандартного раствора | В | 0,41 |
| $u_{c(\text{гр.р})}^{\text{отн}}$ | Приготовление градуировочных растворов | В | 2,7 |
| $u_{c(\text{разб})}^{\text{отн}}$ | Разбавление пробы | В | 0,80 |
| $u_{c(\text{Vипр})}^{\text{отн}}$ | Отбор аликвот пробы | В | 0,85 |
| $u_{c(\text{подг})}^{\text{отн}}$ | Подготовка проб к измерению | В | 0,99 |
| $u_{\text{ГХ}}^{\text{отн}}$ | Установление градуировочной характеристики | А | 7,5 |
| $u_{\text{повт}}^{\text{отн}}$ | Разброс результатов измерений, полученных в условиях повторяемости | А | 6,8 |
| $u_c^{\text{отн}}$ | Относительная суммарная стандартная неопределенность, % | | 11,6 |
| $U^{\text{отн}}$ | Относительная расширенная неопределенность, %, при $k=2, p=0,95$ | | 23,2 |
| | ПРИНЯТО | | 23 |

В результате проведенной оценки неопределенности фотометрического определения содержания ингибитора коррозии было установлено, что значение относительной расширенной неопределенности $U^{\text{отн}}$, %, демонстрирует большее соответствие значению показателя точности, указанному в научной литературе [4] и значительно превышает границы погрешности $\pm\delta$, отн.%, установленные стандартом [28]. Указанное обстоятельство свидетельствует о том, что действующий показатель точности, регламентированный стандартом [28], возможно, не в полной мере отражает реальную точность фотометрического определения в условиях его практического применения. В связи с этим предлагается пересмотреть подход к нормированию точности в стандарте [28], внедрив в него понятие неопределенности измерений, что позволит повысить достоверность результатов измерений и обеспечить принятие более обоснованных управленческих решений в области контроля эффективности ингибирования.

Прописанная в работе процедура оценки неопределенности измерений может быть адаптирована и внедрена в практику испытательных лабораторий, осуществляющих контроль качества ингибиторов коррозии и других реагентов. Кроме того, полученное значение расширенной неопределенности может служить метрологическим обоснованием для результатов фотометрического определения ингибитора коррозии, что важно для обеспечения достоверности и точности данных в нефтегазовом машиностроении и нефтегазовой отрасли.

Список источников

1. Ежегодные отчеты о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору [Электронный ресурс]. URL: https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/ (свободный, дата обращения: 01.09.2025).
2. Ингибиторы углекислотной коррозии: современное состояние исследований и разработок / М.В. Чудакова, К.А. Овчинников, Д.Н. Ульянов и др. // Записки Горного института. 2025. Т. 271. С. 3-21.
3. Выявление причин аварий на объектах нефтегазового машиностроения / Шарафиева Р.Р., Денисова Я.В., Сопин В.Ф. // Проблемы машиностроения: современные технологии обработки, материалы, машины, агрегаты: материалы Всероссийской науч.-техн. конф. Махачкала: Дагестанский гос. техн. ун-т, 2024. С. 216-219.
4. Лестев А.Е., Ившин Я.В. Защита нефтегазового оборудования ингибиторами коррозии. Методы испытаний эффективности и физико-химических параметров ингибиторов коррозии: учеб.-метод. пособие. Казань: Изд-во КНИТУ, 2022. 92 с.
5. Downhole corrosion inhibitors for oil and gas production – a review / Askari M., Aliofkhaezrai M., Jafari R. et al. // Applied Surface Science Advances. 2021, vol. 6, 100128. DOI:10.1016/j.apsadv.2021.100128
6. Гайзуллин А.Д., Вагапов Р.К., Запечалов Д.Н. Технологические аспекты применения ингибиторной защиты от коррозии на газовых месторождениях // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2025. № 2 (146). С. 85-92.
7. Коррозия и защита нефтепромышленного оборудования: учеб. пособие / Маркин А.Н., Ткачева В.Э., Дресвян-

- ников А.Ф., Ахметова А.Н. Казань: Изд-во КНИТУ, 2022. 188 с.
8. Ингибиторы коррозии для защиты технологического оборудования нефтепромышленности, эксплуатируемого в сероводородсодержащих средах / Леонтьева М.Е., Агаркова М.О., Демидова Ю.В. и др. // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2025. Т. 68. № 7. С. 6-19. DOI: 10.6060/ivkkt.20256807.7213
 9. Ходус А.С., Бурков П.В. Механизмы коррозии и методы ингибиторной защиты оборудования нефтегазовой отрасли // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2024. Т. 14. № 4. С. 348-355. DOI: 10.28999/2541-9595-2024-14-4-348-355
 10. Маркин А.Н., Бриков А.В. Стратегия химизации крупных нефтегазодобывающих предприятий России // Нефтепромысловое дело. 2019. № 3. С. 64-69. DOI: 10.30713/0207-2351-2019-3-64-69
 11. ГОСТ ISO/IEC 17025-2019. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. М.: Стандартинформ, 2021. 25 с.
 12. ГОСТ 34100.3-2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008. Неопределенность измерения. Ч. 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. М.: Стандартинформ, 2018. 104 с.
 13. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement: First edition. ISO, Switzerland, 1993. 101 p.
 14. Оценка неопределенности измерения при определении кислотности молока методом с применением индикатора фенолфталеина / Хамханова Д.Н., Дамдинсурэн Э., Дарбакова Н.В., Сундарон Э.М. // Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления. 2025. № 2 (97). С. 30-38. DOI 10.53980/24131997_2025_2_30
 15. ГОСТ 31371.7-2020. Газ природный. Определение состава методом газовой хроматографии с оценкой неопределенности. Ч. 7. Методика измерений молярной доли компонентов. М.: Стандартинформ, 2020. 39 с.
 16. ГОСТ 31369-2021 (ISO 6976:2016). Газ природный. Вычисление теплоты сгорания, плотности, относительной плотности и числа Воббе на основе компонентного состава. М.: Российский институт стандартизации, 2021. 43 с.
 17. Оценка неопределенности измерений при определении содержания жира в молоке. Стандартный метод / Д.Н. Хамханова, Н.В. Митыпова, Ф.П. Балдынова, Э. Дамдинсурэн // Контроль качества продукции. 2023. № 7. С. 33-37.
 18. Оценка неопределенности измерения при определении содержания жира в молоке. Метод с использованием анализатора типа «Клевер-2» / Д.Н. Хамханова, Н.В. Митыпова, Ф.П. Балдынова, Э. Дамдинсурэн // Контроль качества продукции. 2023. № 8. С. 38-42.
 19. Оценка неопределенности результатов измерений при определении потери в массе при высушивании биологических лекарственных препаратов / Фадейкина О.В., Воробаев А.А., Давыдов Д.С., Волкова Р.А. // Биопрепараты. Профилактика, диагностика, лечение. 2023. Т. 23. № 3-1. С. 452-462. DOI: 10.30895/2221-996X-2023-23-3-1-452-462
 20. Мельникова О.А., Дедюхина А.В., Мельников М.Ю. Методика определения неопределенности при калибровке ВЭЖХ на примере кофеина // Современные проблемы здравоохранения и медицинской статистики. 2024. № 5. С. 47-58. DOI: 10.24412/2312-2935-2024-5-47-58
 21. Чуновкина А.Г. Оценка неопределенности измерений при установлении метрологической прослеживаемости результатов клинических исследований биологических проб. Лабораторная служба. 2020. № 9 (3). С. 32-40. DOI: 10.17116/labs2020903132
 22. Оценка неопределенности измерений в лабораторной медицине / Чуновкина А.Г., Тумилович А.А., Степанов А.В. и др. // Измерительная техника. 2022. № 7. С. 69-74. DOI: 10.32446/0368-1025it.2022-7-69-74
 23. Троеглазова А.В. Оценка неопределенности методики сорбционно-фотометрического определения содержания рения (VII) // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация. 2022. № 2. С. 24-31.
 24. Алексеев А.В., Якимович П.В. Оценка бюджетов неопределенности при анализе никеля методами ИСП-МС и масс-спектрометрии высокого разрешения с тлеющим разрядом // Вестник Московского университета. Сер. 2. Химия. Т. 63. № 4. С. 283-293.
 25. Разработка процедуры оценивания неопределенности результатов измерений весов лабораторных электронных / М.Н. Белая, Е.Ф. Бариева, М. Коршунова и др. // Наука и бизнес: пути развития. 2025. № 4 (166). С. 141-145.
 26. Хан С.Г., Федоренко И.А. Методы оценивания неопределенности медицинских измерений и их применение при калибровке средств измерений // Биомедицинская радиоэлектроника. 2024. Т. 27. № 2. С. 75-79. DOI: 10.18127/j15604136-202402-10
 27. Мишура Т.П. Точностные характеристики средств измерений силы переменного электрического тока в соответствии с концепцией неопределенности // Актуальные проблемы экономики и управления. 2024. № 4 (44). С. 3-6.
 28. СТО Газпром 9.3-004-2009. Защита от коррозии. Методика выполнения измерений массовой концентрации азотсодержащих ингибиторов коррозии в жидких углеводородах, пластовой воде и водометанольных растворах. М.: ООО «Газпром экспо», 2009. 23 с.
 29. Шарафиева Р.Р., Денисова Я.В., Соико А.И. Оценка неопределенности измерений при контроле азотсодержащих ингибиторов коррозии // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2025. Т. 15. № 3. С. 280-288. DOI: 10.28999/2541-9595-2025-15-3-280-288
 30. QUAM:2012.P1-RU. Руководство ЕВРАХИМ/СИТАК CG4. Количественное описание неопределенности в аналитических измерениях. 3-е изд. 165 с.
 31. Р 1323565.2.002-2022. Государственная система обеспечения единства измерений. Алгоритмы построения градуировочных характеристик средств измерений состава веществ и материалов и оценивание их погрешностей (неопределенностей). Оценка погрешности (неопределенности) линейных градуировочных характеристик при использовании метода наименьших квадратов. М.: Российский институт стандартизации, 2023. 16 с

References

- Annual report on the activities of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision Service. Available at: https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/ (Accessed on September 01, 2025).
- Chudakova M.V., Ovchinnikov K.A., Ulyanov D.N. et al. Inhibitors of carbon dioxide corrosion: current state of research and development. *Zapiski Gornogo Instituta* [Journal of Mining Institute]. 2025;271:3-21. (In Russ.)
- Sharafieva R.R., Denisova Ya.V., Sopin V.F. Identification of causes of accidents at oil and gas engineering facilities. Problemy mashinostroeniya: sovremennye tekhnologii obrabotki, materialy, mashiny, agregaty. Materialy Vserossiyskoy nauch.-tekhn. konferentsii [Problems of mechanical engineering: modern processing technologies, materials, machinery, units. Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference]. Makhachkala: Dagestan State Technical University, 2024, pp. 216-219. (In Russ.)
- Lestev A.E., Ivshin Ya.V. Zashchita neftegazovogo oborudovaniya ingibitorami korrozii. Metody ispytaniy effektivnosti i fiziko-khimicheskikh parametrov ingibitorov korrozii: uchebno-metodicheskoe posobie [Protection of oil and gas equipment with corrosion inhibitors. Methods for testing the effectiveness and physicochemical parameters of corrosion inhibitors: study guide]. Kazan: Publishing House of KNITU, 2022, 92 p. (In Russ.)
- Askari M., Aliofkhaezai M., Jafari R. et al. Downhole corrosion inhibitors for oil and gas production – a review. *Appl. Surf. Sci. Adv.* 2021;6:100128. DOI:10.1016/j.apsadv.2021.100128
- Gayzullin A.D., Vagapov R.K., Zapevalov D.N. Technological aspects of applying corrosion inhibitor protection at gas fields. *Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa* [Equipment and Technologies for the Oil and Gas Complex]. 2025;(2(146)):85-92. (In Russ.)
- Markin A.N., Tkacheva V.E., Dresvyannikov A.F., Akhmetova A.N. *Korroziya i zashchita neftepromyslovogo oborudovaniya: uchebnoe posobie* [Corrosion and protection of oilfield equipment: textbook]. Kazan: Publishing House of KNITU, 2022, 188 p. (In Russ.)
- Leontieva M.E., Agarkova M.O., Demidova Yu.V. et al. Corrosion inhibitors for protection of oilfield equipment operating in hydrogen sulfide environments. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Seriya khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [News of Higher Educational Institutions. Chemistry and Chemical Technology]. 2025;68(7):6-19. (In Russ.) DOI: 10.6060/ivkkt.20256807.7213
- Khodus A.S., Burkov P.V. Corrosion mechanisms and inhibitor protection methods for oil and gas industry equipment. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefii i neftiproduktov* [Science and Technology of Pipeline Transport of Oil and Oil Products]. 2024;14(4):348-355. (In Russ.) DOI: 10.28999/2541-9595-2024-14-4-348-355
- Markin A.N., Brikov A.V. Strategy of chemicalization of large oil and gas enterprises in Russia. *Neftepromyslovoe delo* [Oilfield Business]. 2019;(3):64-69. (In Russ.) DOI: 10.30713/0207-2351-2019-3-64-69
- State standard GOST ISO/IEC 17025-2019. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. Moscow: Standartinform Publishing House, 2021, 25 p. (In Russ.)
- State standard GOST 34100.3-2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008. Uncertainty of measurement. Part 3. Guide to the expression of uncertainty in measurement. Moscow: Standartinform Publishing House, 2018, 104 p. (In Russ.)
- Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement: First edition. ISO, Switzerland, 1993, 101 p.
- Khamkhanova D.N., Damdinsuren E., Darbakova N.V., Sundaron E.M. Estimation of measurement uncertainty in milk acidity determination using phenolphthalein indicator method. *Vestnik Vostochno-Sibirskogo Gosudarstvennogo Universiteta Tekhnologii i Upravleniya* [Bulletin of East-Siberian State University of Technology and Management]. 2025;(2(97)):30-38. (In Russ.) DOI: 10.53980/24131997_2025_2_30
- State standard GOST 31371.7-2020. Natural gas. Determination of composition by gas chromatography with uncertainty evaluation. Part 7. Measurement methods for molar fraction of components. Moscow: Standartinform Publishing House, 2020, 39 p. (In Russ.)
- State standard GOST 31369-2021 (ISO 6976:2016). Natural gas. Calculation of calorific value, density, relative density and Wobbe index based on component composition. Moscow: Russian Institute of Standardization, 2021, 43 p. (In Russ.)
- Khamkhanova D.N., Mitypova N.V., Baldynova F.P., Damdinsuren E. Estimation of measurement uncertainty in fat content determination in milk. Standard method. *Kontrol Kachestva Produktsii* [Product Quality Control]. 2023;(7):33-37. (In Russ.)
- Khamkhanova D.N., Mitypova N.V., Baldynova F.P., Damdinsuren E. Estimation of measurement uncertainty in fat content determination in milk by Clover-2 analyzer method. *Kontrol Kachestva Produktsii* [Product Quality Control]. 2023;(8):38-42. (In Russ.)
- Fadeykin O.V., Voropaev A.A., Davydov D.S., Volkova R.A. Estimation of uncertainty of measurement results for mass loss determination upon drying of biological medicinal products. *Biopreparaty. Profilaktika, diagnostika, Llechenie* [Biological Preparations. Prevention, Diagnosis, Treatment]. 2023;23(3-1):452-462. (In Russ.) DOI: 10.30895/2221-996X-2023-23-3-1-452-462
- Melnikova O.A., Dedyukhina A.V., Melnikov M.Yu. Procedure for estimation of uncertainty in HPLC calibration on the example of caffeine. *Sovremennye problemy zdoravookhraneniya i meditsinskoy statistiki* [Modern problems of healthcare and medical statistics]. 2024;(5):47-58. DOI: 10.24412/2312-2935-2024-5-47-58
- Chunovkina A.G. Estimation of measurement uncertainty in establishing metrological traceability of clinical biological sample test results. *Laboratornaya sluzhba* [Laboratory Service]. 2020;(9(3)):32-40. (In Russ.) DOI: 10.17116/labs2020903132
- Chunovkina A.G., Tumilovich A.A., Stepanov A.V. et al. Estimation of measurement uncertainty in laboratory medicine. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement techniques]. 2022;(7):69-74. (In Russ.) DOI: 10.32446/0368-1025it.2022-7-69-74
- Troglazova A.V. Uncertainty estimation of sorption-photometric method for rhenium (VII) content determina-

- tion. *Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Khimiya. Biologiya. Farmatsiya* [Bulletin of Voronezh State University. Series: Chemistry. Biology. Pharmacy]. 2022;(2):24-31. (In Russ.)
24. Alekseev A.V., Yakimovich P.V. Uncertainty budget assessment for nickel analysis by ICP-MS and high-resolution glow discharge mass spectrometry. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 2. Khimiya* [Moscow University Bulletin. Series 2. Chemistry]. 2022;63(4):283-293. (In Russ.)
 25. Belaya M.N., Barieva E.F., Korshunova M. et al. Development of procedure for uncertainty estimation of laboratory electronic balance measurement results. *Nauka i biznes: puty razvitiya* [Science and business: ways of development]. 2025;(4(166)):141-145. (In Russ.)
 26. Khan S.G., Fedorenko I.A. Methods for estimation of uncertainty in medical measurements and their application in measurement instruments calibration. *Biomeditsinskaya radioelektronika* [Biomedical radioelectronics]. 2024;27(2):75-79. (In Russ.) DOI: 10.18127/j15604136-202402-10
 27. Mishura T.P. Accuracy characteristics of means for measuring alternating electric current force according to the uncertainty concept. *Aktualnye problemy ekonomiki i upravleniya* [Current Problems of Economics and Management]. 2024;(4(44)):3-6. (In Russ.)
 28. Standard STO Gazprom 9.3-004-2009. Corrosion protection. Procedure for measuring mass concentration of nitrogen-containing corrosion inhibitors in liquid hydrocarbons, formation water and water-methanol solutions. Moscow: Gazprom Expo, 2009, 23 p. (In Russ.)
 29. Sharafieva R.R., Denisova Ya.V., Soyko A.I. Uncertainty evaluation of measurements in the control of nitrogen-containing corrosion inhibitors. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefii i nefteproduktov* [Science and technologies of pipeline transport of oil and petroleum products]. 2025;15(3):280-288. (In Russ.) DOI: 10.28999/2541-9595-2025-15-3-280-288.
 30. QUAM:2012.P1-RU. EURACHEM/SITAC CG4 Guide. Quantitative Description of Uncertainty in Analytical Measurements. 165 p.
 31. P 1323565.2.002-2022. State system for ensuring the uniformity of measurements. Algorithms for constructing calibration characteristics of measuring instruments for the composition of substances and materials and estimation of their errors (uncertainties). Estimation of the error (uncertainty) of linear calibration characteristics using the least squares method. Moscow: Russian Institute of Standardization, 2023, 16 p. (In Russ.).

Поступила 03.10.2025; принята к публикации 18.11.2025; опубликована 31.03.2026
Submitted 03/10/2025; revised 18/11/2025; published 31/03/2026

Шарафиева Регина Рафгатовна – соискатель, кафедра аналитической химии, сертификации и менеджмента качества,
Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия.
Email: regina94sh19@gmail.com. ORCID 0009-0009-9699-7434

Денисова Яна Владимировна – кандидат экономических наук, доцент кафедры аналитической химии, сертификации и менеджмента качества,
Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия.
Email: yana-denisova@inbox.ru. ORCID 0000-0003-1242-6909

Сопин Владимир Федорович – доктор химических наук, профессор кафедры аналитической химии, сертификации и менеджмента качества,
Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия.
Email: vlad_sopin24@rambler.ru. ORCID 0000-0002-9112-2550

Regina R. Sharafieva – degree-seeking applicant, Department of Analytical Chemistry, Certification and Quality Management,
Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia.
Email: regina94sh19@gmail.com. ORCID 0009-0009-9699-7434

Yana V. Denisova – PhD (Eng.), Associate Professor, Department of Analytical Chemistry, Certification and Quality Management,
Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia.
Email: yana-denisova@inbox.ru. ORCID 0000-0003-1242-6909

Vladimir F. Sopin – DrSc (Eng.), Professor, Department of Analytical Chemistry, Certification and Quality Management,
Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia.
Email: vlad_sopin24@rambler.ru. ORCID 0000-0002-9112-2550

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

MODELLING OF METALLURGICAL PROCESSES

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 658.5
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-1-133-141



АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ НАХОЖДЕНИЕ И РАСПОЗНАВАНИЕ ДЛИН ДЕТАЛЕЙ ТИПА ТЕЛА ВРАЩЕНИЯ НА ЧЕРТЕЖАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНСТРУМЕНТОВ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

Кузнецов С.В., Роговик А.А.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). На данный момент инструменты компьютерного зрения и нейронные сети получают все большее распространение во всех областях и сферах деятельности человека. Сейчас их уже активно применяют в технике, медицине, образовании, создании различных предметов искусства и в других направлениях деятельности. Не остаётся в стороне и машиностроительная область, где их также активно внедряют. В качестве одного из направлений возможного применения нейронных сетей для машиностроения предлагается применение моделей для распознавания объектов на изображениях и видео для работы с чертежами. Данный подход позволит существенно сократить трудозатраты при подготовке документации для запуска изделия в производство применительно к предприятиям, имеющим детали типа тела вращения в своей производственной номенклатуре, что является актуальным, новым и перспективным в условиях современного производства. **Цель работы.** Главной целью работы являлось создание модели на основе нейронной сети, способной эффективно находить на чертеже область, содержащую длину деталей типа тел вращения, с дальнейшим созданием программы для ЭВМ, использующей данную модель и повышающую её эффективность и практическую применимость. **Используемые методы.** В ходе выполнения работы было использовано несколько основных методов: обучения и работы с моделью для распознавания объектов на изображении и видео; написания программ для ЭВМ на языке программирования Python; оптического распознавания текста. **Результат.** Результатом данной работы стало создание программы для ЭВМ, которая способна с высокой эффективностью находить на чертеже область, содержащую длину детали, считывать текст с этой области, который является значением длины, и заносить результаты в таблицу в редактируемом формате. **Практическая значимость.** Данная программа имеет существенные перспективы практического применения, так как она сможет помочь автоматизировать планирование производства деталей типа тела вращения, например, при определении нормы расхода материала на детали или при проверке габаритов при назначении используемого для их изготовления оборудования и группировании.

Ключевые слова: YOLOv5, EasyOCR, чертежи, токарная обработка, детали типа тел вращения, детекция объектов, нейронные сети, распознавание объектов, компьютерное зрение

© Кузнецов С.В., Роговик А.А., 2026

Для цитирования

Кузнецов С.В., Роговик А.А. Автоматизированное нахождение и распознавание длин деталей типа тела вращения на чертежах с использованием инструментов компьютерного зрения // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №1. С. 133-141. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-133-141>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

AUTOMATED DETECTION AND RECOGNITION OF LENGTHS OF ROTATIONAL PARTS IN TECHNICAL DRAWINGS USING COMPUTER VISION TOOLS

Kuznetsov S.V., Rogovik A.A.

Nizhny Novgorod State Technical University named after R.A. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). At the moment, computer vision tools and neural networks are becoming increasingly widespread in all fields and spheres of human activity. They are already used in technology, medicine, education, the creation of various art objects and in other activity areas. The mechanical engineering industry is also actively implementing them. As one of the possible applications of neural networks for mechanical engineering, it is proposed to use models for recognizing objects in images and videos for working with drawings. This approach will significantly reduce labor costs when preparing documentation for launching the product into production. This applies to enterprises that have rotational parts in their production range, which is relevant, new and promising in modern production conditions. **Objectives.** The work is aimed at creating a model based on a neural network capable of efficiently detecting an area in a drawing containing the length of rotational parts with the further creation of a computer program using this model and increasing its efficiency and practical applicability. **Methods Applied.** In the course of the work, several basic methods have been used: learning and working with a model for recognizing objects in images and videos; writing computer programs in the Python programming language; optical text recognition. **Result.** The paper presents a computer program that is capable of efficiently detecting an area in a drawing containing the length of a part, reading text from this area, which is the length value, and entering the results into a table in an editable format. **Practical Relevance.** This program has significant prospects for practical application because it can help automate the planning of the production of rotational parts, for example, when determining the consumption rate of materials per part or when checking the dimensions when assigning equipment used for their manufacture and grouping.

Keywords: YOLOv5, EasyOCR, drawings, turning, rotational parts, object detection, neural networks, object recognition, computer vision

For citation

Kuznetsov S.V., Rogovik A.A. Automated Detection and Recognition of Lengths of Rotational Parts in Technical Drawings Using Computer Vision Tools. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 1, pp. 133-141. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-133-141>

Введение

В современном машиностроении четко прослеживается тенденция ухода от человеческого труда при реализации различных производственных процессов и инженерных работ. Это становится возможным благодаря многим факторам, основным из которых является появление новых технических и технологических возможностей и решений, способствующих повышению производительности труда. Поиск и внедрение таких решений являются одними из основных задач, которые стоят перед специалистами в области машиностроения и, в частности, механической обработки.

Одним из таких технических и технологических решений является применение нейронных сетей. На данный момент их применение становится все более и более распространенным, так как они уже доказали свою эффективность и показали явные преимущества их использования. Некоторые возможности их применения можно увидеть в работах [1-5].

На данный момент нейронные сети уже применяются в машиностроении для выполнения таких функций, как:

- разработка различных инженерных продуктов;
- назначение режимов резания материалов;
- онлайн-сопровождение процесса обработки резанием металлов;
- автоматическое управление технологическими процессами для возможности их адаптивного проведения;
- отслеживание работоспособности оборудования и прогнозирования времени его отказа.

В представленной работе описано одно из перспективных направлений возможного применения нейронных сетей, а именно моделей, созданных для распознавания объектов на изображениях и видео. В перспективе полученный результат сможет позволить существенно сократить затраты труда инженеров по планированию производства на предприятиях, которые имеют детали типа тела вращения в своей производственной номенклатуре.

Целью работы является создание модели на основе нейронной сети, способной эффективно определять длину деталей типа тела вращения на чертежах, с дальнейшим созданием программы для ЭВМ, использующей данную модель, которая способна по-

вышать её эффективность и возможности практического применения.

Основные функции полученного программного обеспечения:

- нахождение области, содержащей длину детали на чертеже при помощи модели для распознавания объектов на изображениях;
- распознавание значений длин при помощи инструмента оптического распознавания символов;
- корректировка полученных результатов;
- занесение результатов в таблицу.

В ходе создания описанной программы было использовано несколько основных инструментов и методов:

- методы обучения и работы с моделью для распознавания объектов на изображениях и видео;
- методы написания программ для ЭВМ на языке программирования Python;
- методы оптического распознавания текста.

На этапе анализа имеющейся информации по работе с нейронными сетями были рассмотрены ранее опубликованные работы, посвященные этой теме [6-8]. Особое внимание в них было уделено информации, посвященной работе с моделями для распознавания объектов на изображениях и видео, так как одним из важнейших этапов описанной в данной статье работы был выбор модели.

Вначале было рассмотрено несколько различных моделей, которые имеют открытый исходный код, такие как, например, YOLO (You Only Look Once), SSD (Single Shot Detector) и Mask R-CNN. В итоге для работы была взята модель YOLO версии 5. Данная модель основана на нейронных сетях и хорошо зарекомендовала себя для решения задачи по нахождению объектов на графических изображениях. YOLOv5 (You Only Look Once version 5) обеспечивает одну из самых высоких скоростей работы и точность детекции объектов. Этот алгоритм успешно применяется в различных областях, включая обнаружение объектов на изображениях и видео. Данная нейронная сеть основана на архитектуре DarkNet, которая изначально разрабатывалась для задач компьютерного зрения. Преимущества и способы работы с моделью YOLO были описаны в статьях [9, 10].

В качестве инструмента для распознавания текста была использована библиотека оптического распознавания символов (OCR) с открытым исходным кодом, разработанная компанией Jaided AI – EasyOCR и являющаяся наиболее доступной и показывающей высокую точность распознавания символов. Преимущества оптического распознавания символов были описаны в работах [11-13]. Данная библиотека предназначена для извлечения текста из изображений и сканированных документов с высокой точностью. EasyOCR поддерживает более 80 языков, включая английский, китайский, арабский и др. Также стоит отметить, что она способна распознавать необходи-

мые нам символы – цифры и буквы латинского алфавита.

Основные преимущества работы данной библиотеки:

- открытый исходный код;
- простота использования, так как для работы необходимо всего несколько строк кода;
- наличие предварительно обученных моделей глубокого обучения, которые могут эффективно распознавать текст в различных языках и шрифтах;
- возможность работы с изображениями низкого качества.

Если говорить о новизне работы и имеющихся аналогах, то после проведенного анализа можно с уверенностью сказать, что подобные изыскания никем ранее не проводились.

Разработанная программа имеет хорошие перспективы для практического применения, так как способна помочь автоматизировать планирование производства деталей типа тела вращения, таких как валы, оси, фланцы, втулка, диски и др. Перспективы применения нейронных сетей в этой области ранее были описаны в работах [14, 15].

Данный метод может быть использован, например, для определения нормы расхода материала на деталь, проверки габаритов при назначении используемого для ее изготовления оборудования. Также данный продукт может быть полезен при сортировке и группировании деталей, так как длина является одной из основных характеристик детали, а преимущества группирования были описаны в ранее опубликованных работах [16-18].

Исходя из вышесказанного, можно сказать, что данная работа может быть интересна представителям предприятий единичного и серийного производства, которые имеют достаточную производственную номенклатуру, состоящую из деталей типа тела вращения, таких как валы, оси, фланцы, втулка, диски и др.

Этапы проведения работы по созданию модели

Первый и один из самых главных этапов – это сбор данных для обучения модели. То есть создание DataSet – набора изображений для машинного обучения. Создание DataSet является одним из основных этапов обучения модели, так как именно от его корректности зависит точность модели, а также качество и смысл всей дальнейшей работы.

При создании описанной модели DataSet корректировался несколько раз для обеспечения приемлемых показателей точности. Во время данных изменений было выявлено два основных правила для успешного обучения модели для нахождения длин токарных деталей.

Первое правило заключается в том, что DataSet должен содержать примерно равное количество различных типов деталей тел вращения. Были выделены три основных группы по соотношению длины L и наибольшего наружного диаметра D :

– L до $0,5D$ включительно. К этой группе относятся детали типа: фланцы, катушки, кольца, диски и др. (рис. 1, в).

– L свыше $0,5$ до $2D$ включительно. К этой группе относятся детали типа: втулки, катушки, шкивы и др. (рис. 1, б).

– L свыше $2D$. К этой группе относятся детали типа: валы, шпиндели, оси, штоки и др. (рис. 1, а).

Типовые представители трех данных групп представлены на рис. 1.

Второе правило состоит в том, что DataSet должен содержать примерно равное количество деталей с различным способом указания полей допусков размеров для их длин. А именно включать в себя:

- условное обозначение полей допусков (рис. 2, а);
- указание числовых значений предельных отклонений (рис. 2, б);
- условное обозначение полей допусков с указанием их числовых значений (рис. 2, в);
- размеры с неуказанными полями допусков (рис. 2, г).

В итоге было собрано 750 изображений чертежей в различных форматах (JPEG, JPG, PNG), с которыми работает модель YOLOv5. Далее они были разделены на две группы: тренировочный и валидационный (проверочный) наборы в соотношении 80 и 20%. Тренировочный набор составил 600 изображений, валидационный – 150 изображений.

Конечный этап создания DataSet – это разметка изображений, то есть создание для каждого изображения такого файла, который содержит информацию о координатах на изображении, содержащих в себе искомый объект.

Все изображения были размечены для обучения YOLO в специально предназначенной для этого программе. Примеры отображения размеченных областей представлены на рис. 3.

Таким образом, при разметке выбираем область, которая содержит длину детали. В результате полученная модель должна будет выделять подобным образом на валидационном и тестовом наборе чертежей области, которые, по её мнению, содержат длину детали.

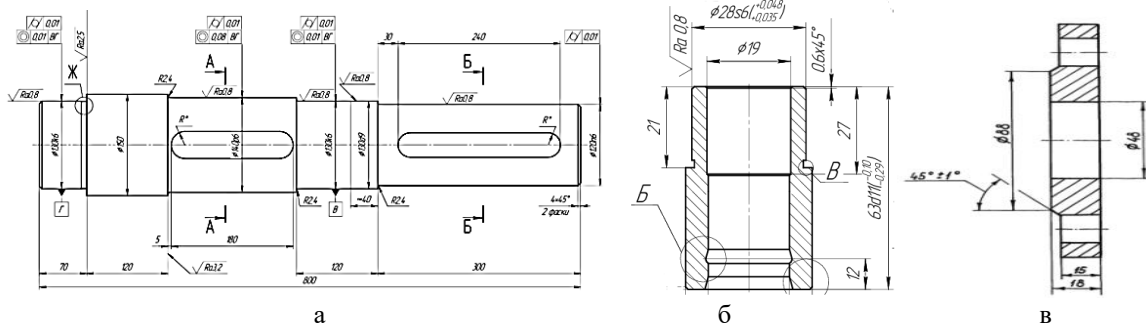


Рис. 1. Типовые представители групп деталей из DataSet
Fig. 1. Typical representatives of details groups from the DataSet



Рис. 2. Способы обозначения полей допусков размеров
Fig. 2. Methods of marking dimensional tolerance fields

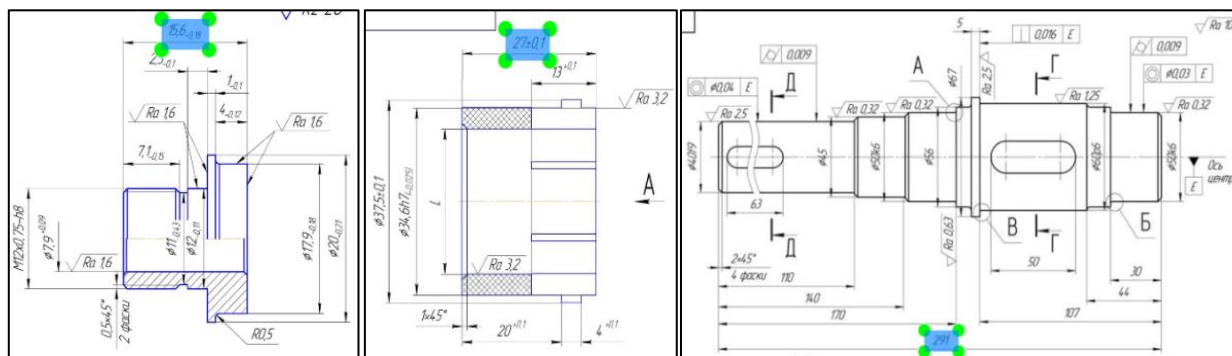


Рис. 3. Примеры размеченных изображений из DataSet
Fig. 3. Examples of marked up images from the DataSet

Второй этап – это обучение модели YOLOv5, предварительно обученной идентифицировать некоторые определенные виды объектов, находить области, содержащие длины деталей типа тела вращения на чертежах. Обучение производилось на наборе данных, сбор которых был описан на первом этапе.

Исходные данные для обучения модели выглядели следующим образом:

- разрешение изображений по большей стороне – 960;
- количество шагов – 16;
- количество эпох обучения – 30.

На рис. 4 представлена выборка из валидационной части DataSet, которую обработала модель во время обучения. Выборка взята из эпохи обучения с

наилучшими результатами. На рисунке видно, как модель находила и выделяла области, содержащие длины деталей. Также можно заметить, что на части изображений модель выделяет несколько значений, далее эта проблема будет решена в разделе «Создание программы для ЭВМ» путем выбора максимального из предложенных значений.

После обучения получаем файл готовой модели, которая состоит из 157 слоев и 7012822 параметров. Четыре основных показателя эффективности, которые применяют для оценки получающихся моделей YOLO, представлены в таблице.

На рис. 5 можно увидеть графики, которые показывают, как изменялись значения четырех основных показателей во время всех четырех эпох обучения.

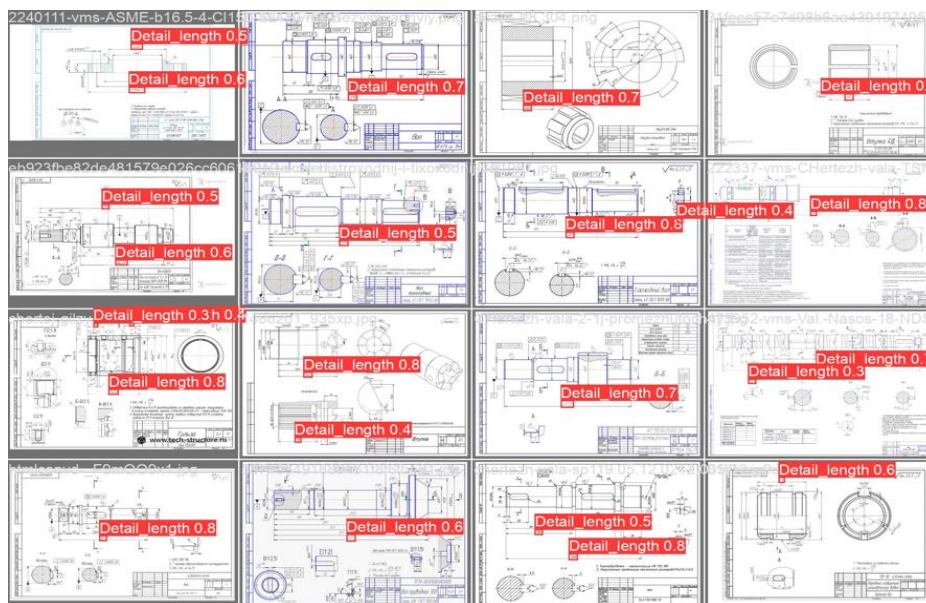


Рис. 4. Примеры чертежей деталей из валидационного набора данных с полученными во время обучения модели результатами

Fig. 4. Examples of drawings of parts from the validation dataset with the results obtained during model training

Таблица. Показатели эффективности обученной модели

Table. Performance indicators of the trained model

| Точность модели P | Отзывчивость модели R | Средняя точность при 50% порог IoU mAP50 | Среднее значение средней точности, определяемое на степенях перекрытия от 0,50 до 0,95, mAP50-95 |
|-------------------|-----------------------|--|--|
| 0,852 | 0,796 | 0,879 | 0,452 |

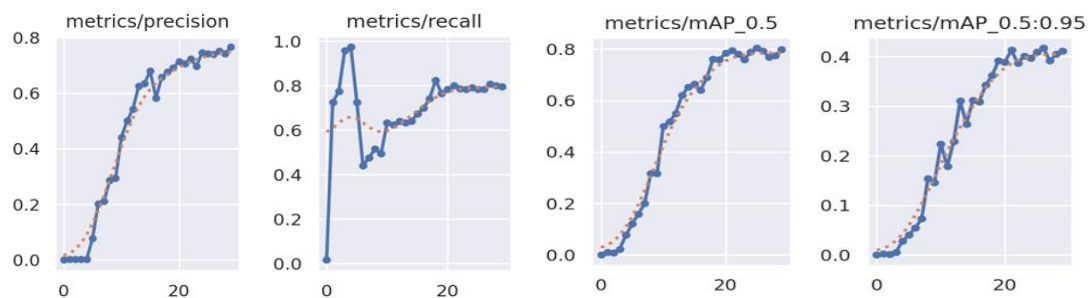


Рис. 5. Графики изменения основных показателей модели во время эпох обучения

Fig. 5. Graphs of changes in key model indicators over training epochs

Третий этап – это оценка качества полученной модели по четырем показателям эффективности и дальнейший её тест на случайной выборке данных. Значения для оценки (P, R, mAP50, mAP50-95) представлены в **таблице**.

Первый оцениваемый показатель P – это точность полученной модели, которая показывает, сколько объектов в валидационном наборе было определено правильно. Полученное значение 0,852 является весьма высоким, так как приемлемым считается значение 0,7.

Второй показатель R – это отзывчивость. Показывает способность модели находить все экземпляры объектов на данных изображениях. Также считается хорошим показателем больше 0,7, мы имеем 0,796.

Третий показатель mAP50 – средняя точность при 50% пороге IoU. Приемлемым результатом является значение, превышающее 0,5, следовательно, полученное значение 0,879 является хорошим.

Четвертый показатель mAP50-90 – среднее значение средней точности, которое определяется на разных степенях перекрытия от 0,50 до 0,95. Здесь приемлемый показатель должен быть выше 0,3, полученная модель имеет 0,452.

После анализа полученных характеристик и графиков был произведен тест полученной после обучения модели на специально подготовленном для этого наборе данных, состоящем из 20 случайных чертежей. Данный тестовый набор был обработан моделью YOLO. В результате были получены следующие результаты:

1) на 18 из 20 чертежей области, содержащие длину детали, были найдены;

2) большинство чертежей были обработаны корректно, как это показано на **рис. 6, а**, но на 4 из 18 были дополнительно выделены и другие размеры, не являющиеся длиной детали, как показано на **рис. 6, б**.

Таким образом, исходя из значений четырех рассмотренных характеристик и результатов теста, можно сказать, что модель способна довольно эффективно находить большинство областей на чертежах, содержащих длину деталей типа тел вращения. Также

стоит отметить, что имеет место быть типовая ошибка, когда модель дополнительно выделяет области, которые являются обычным линейным размером с чертежа, а не длиной, что может помешать дальнейшему использованию модели в практических целях. В следующей части статьи указано решение данной проблемы.

Создание программы для ЭВМ

После создания модели и её тестирования была разработана программа, которая при помощи данной модели может находить длины деталей типа тела вращения на чертежах.

Основные функции разработанной программы:

1) при помощи обученной на предыдущем этапе модели находить координаты областей, содержащих длину детали (по мнению модели);

2) получение вырезанием по координатам нового изображения, которое содержит только длину детали;

3) изменение характеристик вырезанного изображения для повышения точности работы EasyOCR;

4) считывание текста с изображения при помощи EasyOCR;

5) корректировка полученного текста (удаление части, содержащей информацию о полях допусков, и округление числа до целого);

6) проверка того, что на чертеже могло быть найдено несколько областей, содержащих длину (по мнению модели), выбор максимального полученного значения после обработки EasyOCR и корректировки (то есть получение окончательного значения длины детали);

7) занесение данных в документ в формате Excel;

8) последовательное выполнение всех вышеперечисленных функций для каждого чертежа из рабочей папки.

На **рис. 7** показан результат обработки программой представленного чертежа, который показывает, как после обработки выбирается истинное значение длины детали.

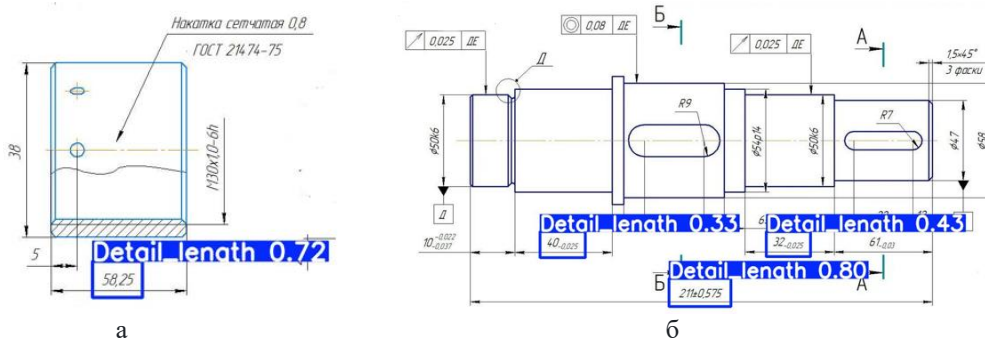


Рис. 6. Примеры обработанных деталей из тестового набора чертежей
Fig. 6. Examples of processed parts from the test set of drawings

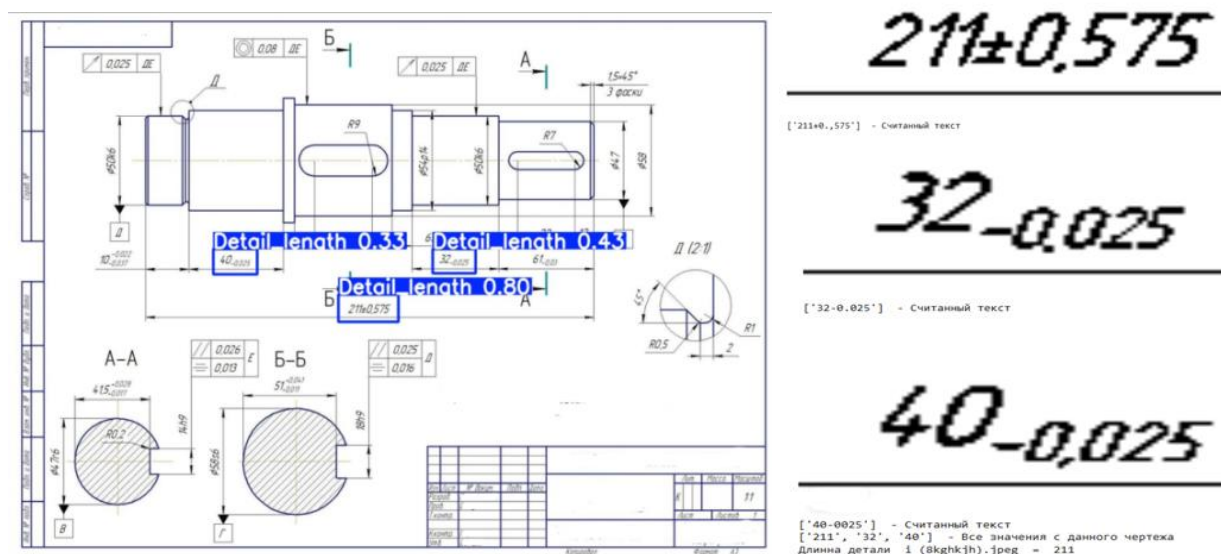


Рис. 7. Результат обработки одного из чертежей из тестового набора, выведенный пользователю разработанной программой

Fig. 7. The result of processing one of the drawings from the test set displayed to the user by the developed program

Конечным этапом работы стало выполнение теста полученной программы с применением обученной нами модели для обнаружения длин на тестовом наборе данных, состоящем из 20 случайных изображений чертежей токарных деталей. После обработки этих изображений был получен Excel-файл, содержащий название изображения и его длину. Программа вывела 18 из 20 длин деталей типа тела вращения. Все 18 полученных значений были определены правильно. Исходя из этого, можно сказать, что программа существенно повысила точность модели и возможность её практического применения.

Заключение

Можно определенно сказать, что полученная модель, основанная на модели для распознавания объектов на фото и видео на основе нейронной сети YOLOv5, может весьма эффективно находить области, содержащие длину детали на большинстве чертежей деталей типа тел вращения, таких как валы, фланцы, втулки, шкивы, пальцы, кольца, диски и т.п. Данный вывод был сделан после анализа четырех полученных после обучения характеристик и теста модели.

Характеристики показали, что модель является довольно перспективной для применения её в работе с чертежами деталей типа тела вращения, так как полученные в ходе работы показатели являются высокими относительно значений, которые считаются хорошими при определении качества полученной модели YOLO. Также был выполнен тест полученной модели, где она показала свою работоспособность, обнаружив 18 из 20 искомым объектов.

Разработанная программа для ЭВМ показала способность значительно повышать эффективность модели, а именно точность определения объекта путем исключения типовой ошибки, когда модель находит и выделяет области, которые являются обычным линейным размером с чертежа, а не длиной. Кроме того, программа существенно повышает практическую значимость описанной работы, так как она позволяет использовать полученную модель для работы с чертежами в автоматизированном режиме, когда на выходе пользователь получает файл формата Excel, содержащий в себе результаты работы модели и программы, готовый к дальнейшей работе в тех или иных целях.

В дальнейшем полученные результаты имеют хорошие перспективы для их практического применения, так как разработанная модель и программа способны помочь частично автоматизировать планирование производства деталей типа тела вращения. Если разобрать конкретные варианты применения разработки, то она может быть использована для определения нормы расхода материала на деталь, проверки габаритов используемого для их изготовления оборудования и при сортировке и группировании деталей.

Исходя из вышесказанного, можно утверждать, что результат работы может быть интересен представителям предприятий единичного и серийного производства, которые имеют производственную номенклатуру, включающую большое количество деталей типа тела вращения.

Список источников

1. Суздалева Н.Н. Потенциал использования нейросетей промышленными предприятиями в условиях российской действительности // Региональная и отраслевая экономика. 2022. №11 (173). С. 91-94.
2. Алтунина К.А., Соколова М.В. Применение нейронных сетей для моделирования процесса токарной обработки // Вестник ТГТУ. 2016. Т. 22. № 1. С. 122-133.
3. Сверточные нейронные сети для выявления дефектов и поврежденных конструкций Степанов Д.В., Макаров А.В., Молотов А.М., Облетов Е.Н. // Промышленное и гражданское строительство. 2024. № 9. С. 52-58.
4. Веретельников А.С., Гавлицкий А.И. Применение искусственного интеллекта в металлообрабатывающей промышленности // Электронный научный журнал «Дневник науки». 2022. №12(72).
5. Алханов А.А. Машинное обучение и его применение в современном мире // Проблемы науки. 2021. №7 (66). С. 25-27.
6. Redmon J., Farhadi A. YOLO9000: Better, Faster, Stronger // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2017, pp. 7263–7271.
7. Redmon J., Shooji F., Farhadi A. YOLOv5 Training and Improving Object Detectors and Segmentation Models with One Click // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2022, pp. 962–972.
8. Feature Pyramid Networks for Object Detection / Lin T.-Y., Dollár P., Girshick R., He K., Hariharan B., Belongie S. // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2017, pp. 936–944.
9. Bochkovskiy A., Wang C. YOLOv5: Creating State-of-the-Art Object Detectors in Real Time. [S. 1.] // ArXiv. 2021, pp. 214–219.
10. Bochkovskiy A. YOLOv7: Trainable Boosted Data-Driven Layer for Real-Time Object Detection. [S. 1.] // ArXiv. 2023, pp. 5147–5155.
11. Давлетов А.Р. Современные методы машинного обучения и технология OCR для автоматизации обработки документов // Вестник науки. 2023. №10. С. 676-698.
12. Hamdi A. OCR with Tesseract, Amazon Textract, and Google Document AI: a benchmarking experiment // Journal of Computational Social Science. 2022, no. 5(1), pp. 861–882.
13. Improving the Accuracy of Tesseract 4.0 OCR Engine Using Convolution-Based Preprocessing / Patel D., et al. // Symmetry. 2020, no. 12(5), pp. 715.
14. Кузнецов С.В., Роговик А.А. Перспектива применения нейронных сетей для планирования загрузки участка механической обработки // International Journal of Humanities and Natural Sciences. 2024. № 9. С. 115-117.
15. Кузнецов С.В., Роговик А.А. Группирование деталей тел вращения типа диск и ему подобных при планировании их изготовления с целью увеличения серийности производства // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2025. Т. 28, №1. С. 24–32. DOI: 10.22213/2413-1172-2025-1-24-32.
16. Митрофанов С.П. Научная организация машиностроительного производства. Ленинград: Машиностроение, 1976. 712 с.
17. Определение коэффициентов штучного времени деталей типа “вал” на основе их подобия / Кузнецов С.В., Аносов М.С., Роговик А.А., Муругов Ю.С. / Научно-технический вестник Поволжья. 2024. № 6. С. 72-75.

References

1. Suzdaleva N.N. The potential of using neural networks by industrial enterprises in the context of Russian reality. *Regionalnaya i otraslevaya ekonomika* [Regional and sectoral economics]. 2022;(11(173)):91-94. (in Russ.)
2. Altunina K.A., Sokolova M.V. Application of neural networks for modeling the turning process. *Vestnik TGTU* [Bulletin of TSTU]. 2016;22(1):122-133. (in Russ.)
3. Stepanov D.V., Makarov A.V., Molotov A.M., Bolotov E.N. Convolutional neural networks for detecting defects and damage to structures. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo* [Industrial and civil engineering]. 2024;(9):52-58. (in Russ.)
4. Veretelnikov A.S., Gavlitsky A.I. Application of artificial intelligence in the metalworking industry. *Elektronniy nauchniy zhurnal «Dnevnik nauki»* [Electronic scientific journal "Diary of Science"]. 2022;(12(72)). (in Russ.)
5. Alkhanov A.A. Machine learning and its application in the modern world. *Problemy nauki* [Problems of Science]. 2021;(7(66)):25-27. (in Russ.)
6. Redmon J., Farhadi A. YOLO9000: Better, Faster, Stronger. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2017;7263-7271.
7. Redman J., Shoji F., Farhadi A. YOLOv5 Training and Improving Object Detector and Segmentation Models with One Click. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2022;962-972.
8. Sin T.-Y., Dollar P., Girshick R., He K., Hariharan B., Belongie S. Feature Pyramid Networks for Object Detection. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2017;936-944.
9. Bochkovsky A., Wang C. Yellow 5: Creating State-of-the-Art Object Detector in Real Time. S. 1. ArXiv. 2021;214-219.
10. Bochkovsky A. YOLOv7: Trainable Boosted Data-Driven Layer for Real-Time Object Detection. S. 1. ArXiv. 2023;5147-5155.
11. Davletov A.R. Modern machine learning methods and OCR technology for document processing automation. *Vestnik nauki* [Bulletin of Science]. 2023;(10):676-698. (in Russ.)
12. Hamdi A. OCR with Tesseract, Amazon Textract, and Google Document AI: a benchmarking experiment. *Journal of Computational Social Science*. 2022;(5(1)):861-882.
13. Patel D. Improving the Accuracy of Tesseract 4.0 OCR Engine Using Convolution-Based Preprocessing. *Symmetry*. 2020;(12(5)):715.
14. Kuznetsov S.V., Rogovik A.A. The prospect of using neural networks to plan the loading of a machining site. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2024;(9):115-117. (in Russ.)
15. Kuznetsov S.V., Rogovik A.A. Grouping rotation bodies of “disc” and similar type when planning their manufacture to increase the serial production. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova* [Bulletin of Kalashnikov Izhevsk State Technical University]. 2025;28(1):24-32. (in Russ.) DOI: 10.22213/2413-1172-2025-1-24-32

16. Mitrofanov S.P. *Nauchnaya organizatsiya mashinostroitel'nogo proizvodstva* [Scientific organization of machine-building production]. Leningrad. Mashinostroenie, 1976, 712 p. (in Russ.)
17. Kuznetsov S.V., Anosov M.S., Rogovik A.A., Murugov Yu.S. Determination of the unit time coefficients of "shaft" type parts based on their similarity. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzhya* [Scientific and Technical Bulletin of the Volga region]. 2024;(6):72-75. (in Russ.)

Поступила 09.10.2025; принята к публикации 01.12.2025; опубликована 31.03.2026
Submitted 09/10/2025; revised 01/12/2025; published 31/03/2026

Кузнецов Сергей Викторович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Машиностроительные технологические комплексы»,

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.

Email: ks251072@yandex.ru. ORCID 0009-0004-9532-1671

Роговик Артем Алексеевич – аспирант,

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.

Email: artem-rogovik@mail.ru. ORCID 0009-0004-4099-7324

Sergey V. Kuznetsov – PhD (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Machine-building technological complexes,

Nizhny Novgorod State Technical University named after R.A. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.

Email: ks251072@yandex.ru . ORCID 0009-0004-9532-1671

Artem A. Rogovik – Postgraduate Student,

Nizhny Novgorod State Technical University named after R.A. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.

Email: artem-rogovik@mail.ru . ORCID 0009-0004-4099-7324



ОЦЕНКА СРЕДНЕЙ ПЛОЩАДИ НЕПОКРЫТИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ПОРОШКОВОМ НАПЫЛЕНИИ

Цициашвили Г.Ш.¹, Лосев А.С.¹, Часовников Д.Р.²

¹Институт прикладной математики ДВО РАН, Владивосток, Россия

²Хабаровское отделение Института прикладной математики ДВО РАН, Хабаровск, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Процедура порошкового напыления широко используется в различных отраслях. Она позволяет в разы увеличить срок службы изделия, защитить его от абразивного воздействия, повысить и улучшить функциональные свойства. Экспериментально установлено, что уменьшение размерности напыляемых частиц позволяет добиваться равномерного покрытия. Поэтому возникает необходимость в разработке соответствующих математических формул, которые позволяют моделировать процесс напыления на поверхность предельно мелких частиц. **Цель работы.** Разработать математический подход, который позволит моделировать процесс напыления на поверхность предельно мелких частиц. **Используемые методы.** Стереологическая формула для булевой модели случайного множества. Теория вероятностей, метод Монте-Карло. **Новизна.** С помощью стереологической формулы получена оценка средней площади квадрата, не покрытой круглыми частицами в ходе их напыления. **Результат.** Построена математическая модель множества точек, закрытых напыляемыми на поверхность единичного квадрата частицами сферической формы радиусом $r(m)$ при $m \rightarrow \infty$. Определена зависимость площади покрытия от радиуса напыляемых частиц и их количества при пуассоновском потоке заданной интенсивности. Получена оценка средней площади квадрата, не покрытой частицами в ходе напыления. Проведен сравнительный анализ полученной оценки с оценкой средней доли незакрытой площади квадрата, вычисленной методом Монте-Карло. **Практическая значимость.** Полученные результаты могут быть использованы при моделировании процесса напыления предельно мелких частиц на поверхность биоимплантатов. Используемая модель может быть использована для решения задачи о перколяции, а именно при определении вероятности соединения противоположных сторон квадрата через незапыленные каналы, что также является предметом исследования в технологических процессах.

Ключевые слова: порошковое напыление, метод Монте-Карло, пуассоновский поток, средняя площадь непокрытия

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПМ ДВО РАН № 075-00459-25-0

© Цициашвили Г.Ш., Лосев А.С., Часовников Д.Р., 2026

Для цитирования

Цициашвили Г.Ш., Лосев А.С., Часовников Д.Р. Оценка средней площади непокрытия поверхности при порошковом напылении // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №1. С. 142-147. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-142-147>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

ESTIMATION OF THE AVERAGE UNCOATED SURFACE AREA DURING POWDER SPRAYING

Tsitsiashvili G.Sh.¹, Losev A.S.¹, Chasovnikov D.R.²

¹ Institute of Applied Mathematics FEB RAS, Vladivostok, Russia

² Khabarovsk Branch of Institute of Applied Mathematics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The powder spraying is widely used in various industries. It allows to significantly increase the service life of the product, protect it from abrasive effects, and enhance its functional properties. Experimentally, it was found that reducing the size of the sprayed particles makes it possible to achieve a uniform coating. Therefore, it is necessary to develop appropriate mathematical formulas that make it possible to simulate the process of spraying extremely fine particles onto the surface. **Objectives.** The work is aimed at developing a mathematical approach that will allow simulating the process of spraying extremely fine particles onto the surface. **Methods Applied.** The authors have used a stereological formula for a Boolean model of a random set, probability theory, and Monte Carlo method. **Originality.** Using a stereological formula, an estimate of the average square area uncoated by round particles during spraying has been obtained. **Result.** A mathematical model has been constructed of a set of points covered by spherical particles of radius sprayed onto the surface of a unit square $r(m)$ at $m \rightarrow \infty$. The dependence of the coating area on the radius of the sprayed particles and their number at a Poisson flow of a given intensity is determined. An estimate of the average square area uncoated by particles during spraying is obtained. A comparative analysis of the obtained estimate with the estimate of the average fraction of the uncoated area of the square calculated by the Monte Carlo method is carried out. **Practical Relevance.** The results obtained can be used in modeling the process of spraying extremely fine particles onto the surface of bioimplants. The model used can be applied to solve the percolation problem, namely, to determine the probability of connecting opposite sides of a square through dust-free channels, which is also a subject of research in technological processes.

Keywords: powder spraying, Monte Carlo method, Poisson flow, average uncoated area

The work was performed within the framework of the state assignment of the Institute of Applied Mathematics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences No. 075-00459-25-00.

For citation

Tsitsiashvili G.Sh., Losev A.S., Chasovnikov D.R. Estimation of the Average Uncoated Surface Area During Powder Spraying. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 1, pp. 142-147. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-142-147>

Введение

Обработка поверхности изделий и отдельных его деталей различными видами порошкового напыления используется для достижения необходимых свойств в их последующей эксплуатации. Известны различные методы нанесения покрытий распылением: металлизация, газопламенное и плазменное напыление [1]. Наносимое покрытие и изделие представляют собой систему, свойства которой зависят от многих факторов (материал покрытия и изделия, метод и режимы нанесения покрытия, толщина покрытия и т.д.) [2–6]. По сравнению с окрашиванием порошковое нанесение имеет ряд преимуществ, а именно оно, уменьшая количество технологических ошибок, требует сниженные энергетические затраты, допускает возможность автоматизации процесса и минимальные экологически вредные выбросы при нанесении, обеспечивает высокое качество покрытий [1].

В целом процедура защиты поверхности, например, металлического изделия за счет порошкового

напыления от коррозии, абразивного воздействия и осаждения солей позволяет в разы увеличить срок его службы, что подчеркивает актуальность данного вопроса исследования как в технологическом, так и в практическом плане. В другом случае, например при обработке биополимерных покрытий, которые используются в медицине, отдельной задачей является поиск оптимального размера напыляемых частиц. В этом случае обрабатываемая поверхность имеет большую пористость, например, биоактивные имплантаты обладают развитой морфологией поверхности и открытой пористостью (при общей пористости 35–50 %) [7]. В работах [8, 9] установлено, что уменьшение размерности напыляемых частиц за счет применения сит в этом случае позволяет получить покрытие с равномерной структурой. Но при этом данные результаты получены исключительно в ходе натуральных экспериментов, что само по себе является дорогостоящим занятием. Поэтому возникает необходимость в разработке соответствующих математи-

ческих формул, которые позволяют моделировать процесс напыления на поверхность предельно мелких частиц.

В настоящей работе математически моделируется процесс порошкового напыления и исследуется зависимость площади покрытия от радиуса напыляемых сферических частиц и их количества. Используется булевская модель случайного множества [10, 11], на которой рассматривается случайное множество точек, определяемое пуассоновским потоком заданной интенсивности на единичном квадрате, к которым приклеены центрами круги фиксированного радиуса. Эта, ставшая уже классической, формула продолжает использоваться в современных приложениях последних лет [12]. С помощью стереологической формулы вычисляется средняя площадь квадрата, не покрытая кругами. Производится численный анализ булевской модели случайного множества методом Монте-Карло.

Методы исследования

Рассмотрим процесс напыления конечного числа частиц сферической формы на поверхность единичного квадрата S . В работе [5] получена стереологическая формула оценки средней площади квадрата, не покры-

той кругами, $S = \exp(-\lambda\pi r^2)$ при фиксированных λ, r . Эта формула нашла многочисленные практические применения, включая самые современные [7].

Рассмотри случай, когда $S = S(m)$, $m \rightarrow \infty$. Обозначим $r(m)$ радиус круга напыляемых частиц с пуассоновского потока интенсивности $\lambda(m)$, координаты центра которых имеют равномерное распределение на отрезке $[0;1]$.

Утверждение. Если $\lambda(m) = m\lambda, r(m) = Rm^{-1/3}$, то $S(m) = \exp(-\lambda m^{1/3} \pi R^2) \rightarrow 0, m \rightarrow \infty$. При этом средний объем всех шаров равен $\frac{4\pi\lambda R^3}{3}$ и не зависит от m .

Из утверждения видно, что увеличивая m , можно добиваться устремления $S(m)$ к нулю (рис. 1), что может быть использовано для улучшения качества напыления в порошковой металлургии.

Замечание 1. Обобщения в этой модели возможны, если выбрать $r(m)$ в виде $r(m) = Rm^{-\gamma}$, $\gamma \leq 1/3$. При этом средний объем напыляемых шаров, а значит, и средняя толщина покрытия единичного квадрата $\frac{4\pi\lambda R^3 m^{1-3\gamma}}{3}$ будут увеличиваться с ростом m .

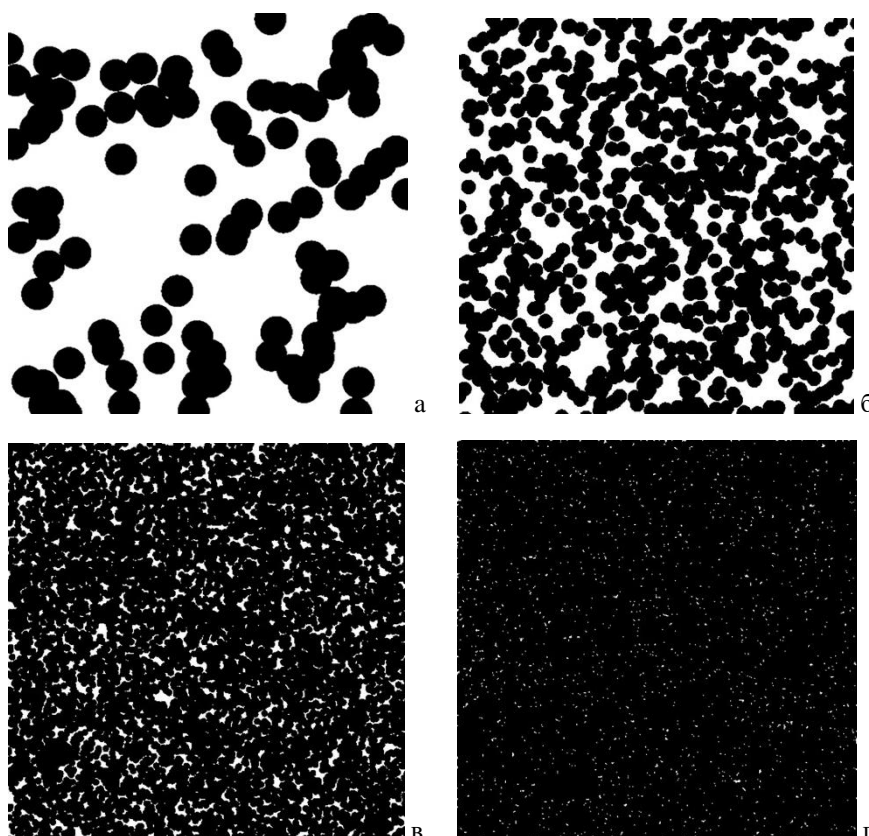


Рис. 1. Пример напыления частиц для $R = 0,4$: а – $m = 1$; б – $m = 10$; в – $m = 100$; г – $m = 1000$
 Fig. 1. Example of particle spraying for $R = 0,4$ and а is $m=1$ б is $m=10$ в is $m=100$ г is $m=1000$

Полученное замечание может быть использовано для оценки средней толщины покрытия, которая является важным фактором при эксплуатации обработанного покрытия в агрессивной среде [1, 2]. Рассмотренную задачу с напылением шариков на плоский квадрат можно обобщить на одномерный случай. Положим, что на единичный отрезок помещаются точки пуассоновского потока интенсивности λ и к каждой точке приклеивается центром отрезок длины $2R$. Тогда средняя суммарная длина S множества точек, не попавших в эти отрезки, вычисляется по формуле $S = \exp(-2\lambda R)$.

Замечание 2. Если $\lambda(m) = m\lambda$, $r(m) = m^{-\gamma}R$, $0 < \gamma < 1$, то $S(m) = \exp(-2m^{1-\gamma}R) \rightarrow 0$, $m \rightarrow \infty$. При этом средняя суммарная длина всех отрезков будет увеличиваться с ростом m , как $2\lambda R m^{1-\gamma}$.

Полученные результаты и их обсуждение

Для инженерной практики необходима проверка данного утверждения с помощью численных методов (метода Монте-Карло) и сравнительного анализа $S(m)$ с оценкой $\rho(m)$ средней доли незакрытой площади квадрата S . Оценка строится путем набрасывания в квадрат K с произвольной стороной равномерно распределенных на квадрате точек, каждая из которых проверяется на принадлежность к описанным Nm кругам и определяется количество $D(m)$ этих точек, не вошедших ни в один из кругов. Тогда при $K \rightarrow \infty$ отношение $\rho(m) = D(m)K$ будет несмещенной и состоятельной оценкой средней площади множества точек, не вошедших ни в один из Nm кругов радиусом $r(m)$.

Вычислительный эксперимент заключается в следующей процедуре. На квадрат белого цвета s уже не с единичной стороной 10 см наносим Nm точек со случайными координатами $(10x, 10y)$, где x, y задаются датчиком случайных чисел с равномерным распределением на отрезке $[0,1]$. Каждая точка является центром черного круга радиусом $r(m) = Rm^{-1/3}$, характеризующего частицу напыляемого порошка. Затем методом Монте-Карло строится оценка $\rho(m)$ средней доли незакрытой площади квадрата s . Процедура повторяется при целых $m = 1, 2, \dots$ для выбранного начального радиуса R и начального количества напыляемых частиц N .

Были проведены вычислительные эксперименты для $R = 0, 2, 0, 3, 0, 4, 0, 6$ с начальным числом точек $N = 100$ и $\lambda = 1$. Получена оценкой $\Delta = |S(m) - \rho(m)|$, которая для всех рассмотренных случаев $\Delta < 0,019$. Подтверждено, что при $m \rightarrow \infty$ множество Nm кругов радиусом $r(m)$ почти образует

так называемый «черный квадрат» Малевича, в качестве примера представлена часть расчетов (см. таблицу).

Таблица. Результаты вычислений для $R = 0, 2$ и $R = 0, 6$

Table. Calculation results for $R = 0, 2$ and $R = 0, 6$

| $R = 0,2 \text{ см}$ | | | | $R = 0,6 \text{ см}$ | | | |
|----------------------|---------|-----------|----------|----------------------|---------|-----------|----------|
| m | $S(m)$ | $\rho(m)$ | Δ | m | $S(m)$ | $\rho(m)$ | Δ |
| 5000 | 0,11662 | 0,12010 | 0,00348 | 1 | 0,32272 | 0,31670 | 0,00602 |
| 10000 | 0,06671 | 0,06570 | 0,00101 | 2 | 0,24052 | 0,25150 | 0,01098 |
| 15000 | 0,04509 | 0,04240 | 0,00269 | 3 | 0,19571 | 0,21450 | 0,01879 |
| 20000 | 0,03301 | 0,03050 | 0,00251 | 4 | 0,16608 | 0,15230 | 0,01378 |
| 25000 | 0,02536 | 0,02540 | 0,00004 | 5 | 0,14458 | 0,16260 | 0,01802 |
| 30000 | 0,02015 | 0,02160 | 0,00145 | 6 | 0,12808 | 0,14400 | 0,01592 |
| 35000 | 0,01640 | 0,01650 | 0,00010 | 7 | 0,11493 | 0,11720 | 0,00227 |
| 40000 | 0,01360 | 0,01370 | 0,00010 | 8 | 0,10415 | 0,09920 | 0,00495 |
| 45000 | 0,01145 | 0,01280 | 0,00135 | 9 | 0,09513 | 0,09390 | 0,00123 |
| 50000 | 0,00976 | 0,00840 | 0,00136 | 10 | 0,08746 | 0,09720 | 0,00974 |
| 55000 | 0,00840 | 0,00990 | 0,00150 | 20 | 0,04642 | 0,05230 | 0,00588 |
| 60000 | 0,00730 | 0,00870 | 0,00140 | 30 | 0,02977 | 0,03120 | 0,00143 |
| 65000 | 0,00639 | 0,00700 | 0,00061 | 40 | 0,02090 | 0,02220 | 0,00130 |
| 70000 | 0,00563 | 0,00570 | 0,00007 | 50 | 0,01551 | 0,01670 | 0,00119 |
| 75000 | 0,00499 | 0,00460 | 0,00039 | 60 | 0,01194 | 0,01110 | 0,00084 |
| 80000 | 0,00445 | 0,00460 | 0,00015 | 70 | 0,00946 | 0,01350 | 0,00404 |
| 85000 | 0,00398 | 0,00430 | 0,00032 | 80 | 0,00765 | 0,01040 | 0,00275 |
| 90000 | 0,00358 | 0,00360 | 0,00002 | 90 | 0,00629 | 0,00750 | 0,00121 |
| 95000 | 0,00323 | 0,00270 | 0,00053 | 100 | 0,00525 | 0,00580 | 0,00055 |

Заключение

Приведенные формулы и результаты вычислений показывают, что, используя булеву модель случайного множества и метод Монте-Карло, можно ставить и решать различные задачи оценки качества напыления в зависимости от размеров напыляемых частиц. Наравне с этим, полученный результат может быть использован в решении задачи о перколяции, а именно при определении вероятности соединения противоположных сторон квадрата незапыленными каналами, что вызывает отдельный интерес в исследованиях и разработках высокоточных цифровых изделий.

Список источников

1. Швецов М.В., Бикбов Г.Б., Калачев И.Ф. Преимущество порошковых покрытий для защиты НКТ // Экспозиция Нефть Газ. 2015. №5 (44). С. 37-39.
2. Нанесение порошковых покрытий детонационным методом / Максименко Е.В., Муравлев Е.В., Казанцев И.В., Ахмадеев И.Р., Ильясов С.Г. // Ползуновский вестник. 2007. №3. С. 64-67.
3. Винокуров Г.Г., Суздалов И.П., Попов О.Н. Разработка статистического подхода к описанию структуры порошковых покрытий и материалов // Физическая мезомеханика. 2004. №S2. С. 65-68.
4. Прогнозирование вероятности получения функциональных свойств порошковых покрытий / Полякова М.А., Извеков Ю.А., Самодурова М.Н., Трофимова

- С.Н., Шеметова В.В., Ярушина Д.В // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №1. С. 149-157.
- Получение защитных гетерофазных покрытий методами импульсной электроискровой и ионно-плазменной обработки / Замулаева Е.И., Кудряшов А.Е., Кирюханцев-Корнеев Ф.В., Башкиров Е.А., Муканов С.К., Погожев Ю.С., Левашов Е.А. // ЭОМ. 2024. №2. С.19-30.
 - Тимохова О.М., Бурмистрова О.Н., Тимохов Р.С. Зависимость между параметрами вязкости и прочности сцепления газотермических покрытий деталей лесных машин // Resources and Technology. 2020. №4. С. 80-94.
 - LeGeros R.Z. Properties of Osteoconductive Biomaterials: Calcium Phosphates // Clinical Orthopaedics and Related Research. 2002, vol. 395, pp. 81–98.
 - Мельникова И.П., Лясникова А.В., Лясников В.Н. Улучшение функциональных характеристик биосовместимых плазмонапыленных покрытий медицинских имплантатов путем повышения равномерности их пористой и стабилизации кристаллической структур // Биотехносфера. 2012. №5-6 (23-24). С.56-61.
 - Мельникова И.П., Лясникова А.В., Лясников В.Н. Морфология частиц гидроксипатита и ее влияние на свойства биокompозитных плазмонапыленных покрытий // Саратовский научно-медицинский журнал. 2013. №3. С. 441-445.
 - Амбарцумян Р.В., Мекке И., Штойян Д. Введение в стохастическую геометрию. М.: Наука, 1989.
 - Stochastic Geometry and Its Applications / Chiu S.N., Stoyan D., Kendall W.S., Mecke J. New York: John Wiley and Sons, 2013.
 - Effective hyperelastic material parameters from microstructures constructed using the planar Boolean model / Brandell M., Brands D., Maïke S., Rheinbach O., Schroder J., Schwarz A., Stoyan D. // Computational Mechanics. 2022, vol. 69, pp. 1295-1321.
 - Vinokurov G.G., Suzdalov I.P., Popov O.N. Razrabotka Development of a statistical approach to describing the structure of powder coatings and materials. Mesomech. *Fizicheskaya mezomekhanika* [Physical mesomechanics]. 2004;(S2):65-68. (In Russ.)
 - Polyakova M.A., Izvekov Yu.A., Samodurova M.N., Trofimova S.N., Shemetova V.V., Yarushina D.V. Forecasting the probability of obtaining functional properties of powder coatings. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025;23(1):149-157. (In Russ.)
 - Zamulaeva E.I., Kudryashov A.E., Kiryukhantsev-Korneev F.V., Bashkirov E.A., Mukanov S.K., Pogozhev Yu.S., Levashov E.A. Obtaining protective heterophase coatings by pulsed electric spark and ion plasma treatment methods. *Elektronnaya obrabotka materialov* [Electronic Processing of Materials]. 2024;(2):19-30. (In Russ.)
 - Timokhova O.M., Burmistrova O.N., Timokhov R.S. Dependence between the parameters of viscosity and adhesion strength of gas-thermal coatings of forest machinery parts. *Resources and Technology* [Resources and Technology]. 2020;(4):80-94. (In Russ.)
 - Le Geros R.Z. Properties of Osteoconductive Biomaterials: Calcium Phosphates. *Clinical Orthopaedics and Related Research*. 2002;395:81-98.
 - Melnikova I.P., Lyasnikova A.V., Lyasnikov V.N. Improving the functional characteristics of biocompatible plasma-coated coatings of medical implants by increasing the uniformity of their porous and stabilizing crystal structures. *Biotekhnosfera* [Biotechnosphere]. 2012;(5-6(23-24)):56-61. (In Russ.)
 - Melnikova I.P., Lyasnikova A.V., Lyasnikov V.N. Morphology of hydroxyapatite particles and its influence on the properties of biocomposite plasma-sprayed coatings. *Saratovskiy nauchno-meditsinskiy zhurnal* [Saratov Scientific Medical Journal]. 2013;(3):441-445. (In Russ.)
 - Ambartsumyan R.V., Mekke I., Shtoyan D. *Vvedenie v stokhasticheskuyu geometriyu* [Introduction to Stochastic Geometry]. Moscow: Nauka, 1989. (In Russ.)
 - Chiu S.N., Stoyan, D., Kendall, W.S., Mecke, J. *Stochastic Geometry and Its Applications*. New York: John Wiley and Sons, 2013.
 - Brandell M., Brands D., Maïke S., Rheinbach O., Schroder J., Schwarz A., Stoyan D. Effective hyperelastic material parameters from microstructures constructed using the planar Boolean model. *Computational Mechanics*. 2022;69:1295-1321.

References

Поступила 01.08.2025; принята к публикации 07.10.2025; опубликована 31.03.2026
Submitted 01/08/2025; revised 07/10/2025; published 31/03/2026

Цициашвили Гурами Шалвович – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник,
Институт прикладной математики ДВО РАН, Владивосток, Россия.
Email: guram@iam.dvo.ru. ORCID 0000-0003-2600-0474.

Лосев Александр Сергеевич – кандидат физико-математических наук, доцент, и.о. руководителя,
Хабаровское отделение Института прикладной математики ДВО РАН, Хабаровск, Россия.
Email: A.S.Losev@yandex.ru. ORCID 0000-0002-5888-3737

Часовников Даниил Родионович – лаборант,
Хабаровское отделение Института прикладной математики ДВО РАН, Хабаровск, Россия.
Email: chdanil14052004@gmail.com

Gurami Sh. Tsitsiashvili – DrSc (Eng.), Professor, Chief Researcher,
Institute of Applied Mathematics, the Far Eastern Branch of Russian Academy sciences. Vladivostok, Russia.
Email: guram@iam.dvo.ru ORCID 0000-0003-2600-0474.

Alexander S. Losev – PhD (Eng.), Associate Professor, Acting Head,
Khabarovsk Branch of Institute of Applied Mathematics the Far Eastern Branch of Russian Academy sciences,
Vladivostok, Russia.

Email: A.S.Losev@yandex.ru. ORCID 0000-0002-5888-3737.

Daniel R. Chasovnikov – Laboratory Assistant,
Khabarovsk Branch of Institute of Applied Mathematics the Far Eastern Branch of Russian Academy sciences,
Vladivostok, Russia.

Email: chdani114052004@gmail.com

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ NEW TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.9
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-1-148-156



АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УЧЕТА И ХРАНЕНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Магдеев К.Е., Сердюкова Е.А., Пятых А.С.

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Современное машиностроение характеризуется активным внедрением высокопроизводительных обрабатывающих центров с ЧПУ. Однако их потенциал часто недостаточно используется из-за неудовлетворительной организации инструментального хозяйства. Существующие на многих предприятиях системы учета и хранения режущего инструмента становятся узким местом, ведущим к значительным простоям обрабатывающего оборудования, потерям инструмента и, как следствие, к росту себестоимости продукции. В данной ситуации высокую актуальность приобретает разработка автоматизированных решений для инструментального обеспечения металлообрабатывающего производства. **Цель работы.** Разработка автоматизированной системы управления режущим инструментом «Инструмент-контроль», включающей модульный шкаф хранения и программное обеспечение для учета, направленной на сокращение операционных затрат и повышение эффективности инструментального хозяйства. **Используемые методы.** В работе использованы методы сравнительного анализа существующих рыночных решений, анализ нормативно-технической документации (ГОСТ 34.602-89, ГОСТ Р 51672-2000), а также методы проектирования аппаратно-программных комплексов. **Новизна.** Предложена оригинальная модульная конструкция автоматизированной системы управления режущим инструментом, адаптируемая под нужды предприятий разного масштаба, с комплексным решением проблемы хранения не только отдельных инструментов, но и инструментальных наладок, что отсутствует в известных аналогах. **Результат.** Формализованы функциональные и технические требования к системе. Спроектирован модульный инструментальный шкаф для организации хранения инструментальных наладок и их комплектующих. Разработан алгоритм работы системы управления инструментом и создана реляционная база данных для ведения полного номенклатурного учёта. Концепция системы закладывает возможность её масштабирования и адаптации под нужды конкретного предприятия, а также обладает потенциалом для дальнейшей интеграции в технологические цепочки «Индустрии 4.0».

Ключевые слова: автоматизированная система управления инструментом, режущий инструмент, инструментальная наладка, ERP-система, информационная безопасность

© Магдеев К.Е., Сердюкова Е.А., Пятых А.С., 2026

Для цитирования

Магдеев К.Е., Сердюкова Е.А., Пятых А.С. Автоматизированная система учета и хранения режущего инструмента // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №1. С. 148-156. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-148-156>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

AUTOMATED SYSTEM FOR ACCOUNTING AND STORAGE OF CUTTING TOOLS

Magdeev K.E., Serdyukova E.A., Pyatykh A.S.

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). Modern mechanical engineering is characterized by the active introduction of high-performance CNC treatment centers. However, their potential is often underutilized due to the unsatisfactory organization of the tool industry. The systems of accounting and storage of cutting tools that exist in many enterprises are becoming a bottleneck leading to significant downtime of processing equipment, tool losses and, as a result, to an increase in production costs. In this situation, the development of automated solutions for tool support in metalworking is becoming highly relevant. **Objectives.** The research is focused on developing an automated cutting tool control system (ACTS) “Tool Control”, which includes a modular storage cabinet and accounting software aimed at reducing operating costs and improving the efficiency of the tool industry. **Methods Applied.** The work uses methods of comparative analysis of existing market solutions, analysis of regulatory and technical documentation (GOST 34.602-89, GOST R 51672-2000), as well as methods of designing hardware and software complexes. **Originality.** An original modular design of the automated control system is proposed, adaptable to the needs of enterprises of different scales, with a comprehensive solution to the problem of storing not only individual tools, but also tool setups, which is absent in known analogues. **Result.** The functional and technical requirements for the system are formalized. A modular tool cabinet has been designed to organize the storage of tool setups and their components. An algorithm for the operation of the tool control system has been developed and a relational database has been created for maintaining complete nomenclatural accounting. The concept of the system makes it possible to scale and adapt it to the needs of a particular enterprise, and also has the potential for further integration into the technological chains of “Industry 4.0”.

Keywords: automated tool control system (ATCS), cutting tool, tool setup, ERP system, information security

For citation

Magdeev K.E., Serdyukova E.A., Pyatykh A.S. Automated System for Accounting and Storage of Cutting Tools. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 1, pp. 148-156. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-148-156>

Введение

В современном машиностроении, где конкуренция высока, а требования рынка постоянно растут, предприятиям приходится искать пути повышения эффективности производства. В этих условиях важную роль играет организация работы с режущим инструментом для станков с ЧПУ, поскольку от него напрямую зависят производительность и качество обработки.

Однако автоматизация учета и хранения инструмента, инструментальных наладок до сих пор остается слабым звеном на многих предприятиях. Традиционные методы управления инструментальным хозяйством, основанные на ручном учете и хранении, не позволяют обеспечить необходимую оперативность выбора нужного инструмента, корректность сборки и своевременность загрузки инструментальных наладок в станок, что приводит к увеличению простоев оборудования, снижению производительности и увеличению затрат [1]. В то же время внедрение автоматизированных систем хранения и управления инструментом позволяет существенно повысить эффективность использования инструментального фонда, сократить время поиска и выдачи инструмента, минимизировать ошибки и потери, а также обеспечить

интеграцию с другими производственными системами предприятия. В зарубежных исследованиях [2] предложена интеллектуальная система выбора инструмента на основе геометрических признаков и RFID-идентификации, демонстрирующая эффективность интеграции баз данных и производственных правил для сокращения времени планирования операций.

Эффективное управление инструментом важно по нескольким причинам. Во-первых, инструмент напрямую влияет на качество изготавливаемых деталей. От его состояния, правильного выбора и своевременной замены напрямую зависят показатели производительности и экономической эффективности производства. Во-вторых, неэффективная организация хранения инструмента приводит к простоям станков, вызванным поиском необходимого инструмента или его отсутствием на складе. Как отмечено в исследованиях [3], затраты на инструментальное обеспечение в массовом производстве достигают 25-30% себестоимости продукции, что подчеркивает критическую важность автоматизированных систем учета. В-третьих, неучтенный расход или поломка ведут к лишним тратам. Таким образом, эффективное управление режущим инструментом, обеспечиваю-

щее его своевременную доступность, контроль состояния и оптимальное использование, является критически важным для поддержания конкурентоспособности машиностроительных предприятий и повышения их общей производственной эффективности. Как отмечается в исследованиях [4], современные вызовы инструментального обеспечения требуют системных решений, включая централизацию производства инструментов и интеграцию АСУ ТП. Это согласуется с задачей данной работы – созданием модульной автоматизированной системы управления режущим инструментом (АСУИ), адаптируемой для предприятий разного масштаба.

Для достижения этой цели одним из наиболее перспективных и эффективных решений является интеграция автоматизированной системы хранения и извлечения (ASRS) с системой управления данными об инструменте (Tool Data Integration, TDI).

Интеграция ASRS и TDI позволяет реализовать комплексный подход к оптимизации процессов инструментального обеспечения станков с ЧПУ, охватывающий все этапы жизненного цикла инструмента, от его поступления на склад до списания. Автоматизированная система хранения и извлечения обеспечивает автоматическое размещение инструмента на хранение, быстрый и безошибочный поиск и извлечение необходимого инструмента по запросу оператора или управляющей программы станка. В свою очередь, система управления данными об инструменте предоставляет централизованную базу данных, содержащую всю необходимую информацию об инструменте, включая его характеристики, параметры резания, ресурс, местоположение и историю использования. Кроме того, достигается существенное улучшение управления запасами инструмента, поскольку система позволяет отслеживать текущий уровень запасов, прогнозировать потребность в инструменте и автоматически формировать заказы на пополнение запасов. Повышается обслуживаемость инструмента, поскольку система позволяет контролировать его состояние, планировать техническое обслуживание и своевременно выявлять изношенные или поврежденные инструменты. В конечном итоге интеграция ASRS и TDI приводит к существенному сокращению простоев оборудования, повышению производительности и снижению затрат на инструментальное обеспечение. Как отмечается в современных исследованиях [5], автоматизированные системы хранения (AS/RS) становятся стандартом для промышленных предприятий, обеспечивая до 40% повышения эффективности использования складских площадей. Также, как показано в исследованиях [6], централизованная база данных инструмента в PDM-системе с синхронизацией библиотек CAD/CAM/ERP позволяет сократить ошибки учета на 30–40%, что критически важно для модульной АСУИ.

Материалы и методы исследования

Разработка АСУИ выполнялась как универсальное решение для нужд научно-исследовательской лаборатории (НИЛ) технологии высокопроизводительной механической обработки, располагающей современным металлообрабатывающим оборудованием. В перечень оборудования входят: 5-координатный фрезерный обрабатывающий центр DMG HSC75V, 5-координатный фрезерный обрабатывающий центр DMG DMU 80P и 3-координатный вертикально-фрезерный центр DMC 635 V. У каждого оборудования свои технические характеристики (табл. 1).

Таблица 1. Технические характеристики фрезерных обрабатывающих центров

Table 1. Technical characteristics of milling machining centers

| Параметр | DMC 635V | HSC75 linear | DMU80P |
|---|----------|--------------|---------------|
| Конус шпинделя | SK-40 | HSK-A63 | SK-50 |
| Количество мест в инструментальном магазине | 20 | 30 | 40 |
| Максимальные размеры инструмента: | | | |
| – длина, мм | 300 | 300 | 550 |
| – диаметр, мм | 80 | 80 | 400 |
| – вес, кг | 6 | 6 | 30 |
| Обороты шпинделя, мин ⁻¹ | 10 000 | 28 000 | 8 000 |
| Мощность шпинделя, кВт | 13 | 55 | 28 |
| Группы обрабатываемых материалов | P, M, K | N | P, M, K, S, H |

Обрабатывающие центры, рассмотренные в табл. 1, имеют шпиндели с разными конусами. Соответственно, для каждого обрабатывающего центра используются инструментальные наладки, отличающиеся базовыми держателями, устанавливаемыми в конус шпинделя. В состав инструментальной наладки входят: режущий инструмент (сборный/цельный), сменные пластины, винты для крепления пластин, цанги, штрельные болты. Кроме того, для закрепления инструмента используются зажимные патроны, которые соединяются с базовыми держателями за счет конуса Carpto.

На основании данных табл. 1 установлено, что вместимость инструментального шкафа должна составлять не менее 30% от количества гнезд в инструментальном магазине обрабатывающего центра. Для решения поставленной задачи были рассмотрены имеющиеся на рынке системы хранения и учета режущего инструмента (рис. 1).

HARD 2000-009011 ЧПУ – инструментальный шкаф с грузоподъемностью до 2000 кг. Оснащен ящиками и специализированными полками под держатели SK/HSK. В качестве защиты используется механический замок.



Рис. 1. Типы инструментальных шкафов: а – HARD; б – Matrix Max; в – Zoller tool Organizer
Fig. 1. A tool cabinets types: a is HARD; б is Matrix Max; в is Zoller tool Organizer

Matrix Max – компактное решение для хранения инструмента и оснастки с электронной защитой. Имеется функция ручного управления при отключении питания.

ZOLLER Tool Organizer – модель, оснащенная функциями подсветки и блокировки ячеек. Имеется возможность интеграции с системой учета инструмента.

Был проведен сравнительный анализ существующих решений (табл. 2).

Таблица 2. Сравнительный анализ инструментальных шкафов

Table 2. Comparative analysis of tool cabinets

| Критерий | Шкаф №1 | Шкаф №2 | Шкаф №3 |
|-------------------------------------|--------------|--------------------|-----------------------------|
| Наименование | HARD | Matrix Max | Zoller tool Organizer |
| Мониторинг износа | Нет | Нет | Дополнительное оборудование |
| Контроль доступа | Механический | Электронный | Электронный |
| Управление запасами | Ручное | Автоматизированное | Автоматизированное |
| Требования к обслуживанию | Низкие | Средние | Высокие |
| Максимальная нагрузка на полку/ящик | 400/80 | 50 | 50-80 |
| Цена | Низкая | Средняя | Высокая |
| Производитель и гарантия | Китай | Япония | Германия |
| Степень защиты | отсутствует | IP54 | IP55 |
| Модульность | отсутствует | есть | отсутствует |

Сравнительный анализ трех типов инструментальных шкафов выявил существенные различия в их характеристиках и сфере применения. Модель HARD 2000 подходит для небольших производств, но отсутствие автоматической системы учета исключает её

использование в рассматриваемых условиях эксплуатации.

Matrix Max оптимален по функциональности, однако пригоден только для хранения сменных пластин и цельных инструментов. Важно отметить, что на данный момент приобретение данного оборудования в России невозможно по ряду причин.

ZOLLER с полной автоматизацией рекомендован для крупных предприятий, но для учета износа и хранения инструментальной наладки требуется приобретение дополнительных модулей. Из-за собственной экосистемы ZOLLER подключение дополнительных модулей других производителей невозможно или затруднительно.

Также были проанализированы патентные аналоги автоматизированной системы хранения инструмента. Наиболее близкими выступают системы, описанные в российском патенте RU 186382 U1 [11] и американском патенте US 8554364 B2 [12].

Российское решение сочетает модуль управления с сенсорной панелью и сканером штрих-кодов с модулем хранения, организованным в виде выдвижных ящиков с индивидуальными ячейками. Каждая ячейка оборудована световым индикатором и оснащена системой контроля наличия инструмента через прижимную пластину с концевым выключателем и сканер считывания штрих-кода, что обеспечивает точный учет содержимого.

Хотя американское решение не имеет аппаратного контроля наличия инструмента в каждой ячейке, оно предлагает передовые функции, такие как управление доступом с использованием биометрии и интеграцию с корпоративными системами учета.

При этом ни одно из решений не обеспечивает возможность хранения инструментальных наладок. Конструкции отсеков пригодны только для размещения сменных пластин. Кроме того, в рассматриваемых

мых патентах отсутствует модульность системы, которая позволяла бы оптимизировать их под конкретные нужды каждого участка производства, эффективно используя доступное пространство и упрощая логистику.

Таким образом, наиболее перспективным направлением представляется разработка адаптивной системы выбора конфигурации шкафа под конкретные

производственные задачи. Автоматизированная система должна обеспечивать хранение и учет готовых к использованию инструментальных наладок, режущего и вспомогательного инструмента и соответствовать требованиям (табл. 3). Разрабатываемая система не должна противоречить нормативно-технической документации ГОСТ 34.602-89 [7], ГОСТ Р 51672-2000 [8] и ГОСТ 12.2.003-91 [9].

Таблица 3. Функциональные и технические требования
Table 3. Functional and technical requirements

| Функциональные требования | |
|---|---|
| Учет инструмента | Ведение централизованной номенклатуры инструмента с атрибутами (наименование, тип, инвентарный номер, технические параметры, поставщик, стоимость) |
| | Учет местоположения каждой единицы инструмента (склад, станок, в ремонте, списан) |
| | Контроль остатков на складах и автоматическое предупреждение о достижении минимального уровня |
| | Учет срока службы и ресурса инструмента (наработка в минутах) |
| | Фиксация истории перемещений и операций по каждому инструменту |
| | Учет конструктивных и геометрических параметров |
| Автоматизация процессов выдачи/приемки | Обеспечение быстрой и безошибочной идентификации инструмента при выдаче сотруднику/на рабочий центр и приемке обратно с использованием RFID |
| | Электронное оформление заявок на выдачу инструмента |
| | Контроль соответствия выданного инструмента производственному заданию |
| Контроль состояния инструмента | Фиксация даты, времени и ответственного лица при каждой операции |
| | Фиксация текущего статуса инструмента (исправен, требует заточки/ремонта, списан) |
| | Ведение истории обслуживания, ремонтов и заточек |
| Формирование отчетности | Формирование регламентных работ по обслуживанию инструментального парка |
| | Генерация стандартных отчетов: оборотные ведомости, карточки учета, отчеты по остаткам, отчеты по движению инструмента за период |
| | Аналитические отчеты: оценка эффективности использования инструмента, анализ потерь и списаний, расчет стоимости инструментального обеспечения на единицу продукции |
| | Возможность настройки и создания пользовательских отчетов |
| Технические требования | |
| Конструктивные особенности | Возможность установки инструментальных наладок на базовых держателях SK40, SK50, HSK63A, Capto 3-8 |
| | Максимальный диаметр устанавливаемого инструмента 160 мм |
| | Максимальная длина инструментальной наладки 350 мм |
| | Минимальная нагрузка на полку/ящик 250/50 кг |
| | Минимальное количество устанавливаемых наладок на базовом держателе: – SK40 – 6 шт.; – SK50 – 12 шт.; – HSK 63A – 9 шт.; – Capto 3-8 – по 10 шт. |
| Надежность и доступность | Коэффициент готовности системы: не менее 0,99 |
| | Время восстановления работоспособности после сбоя: не более 15 мин |
| Производительность | Время реакции системы на типовые запросы пользователя: не более 2 с |
| Технологии идентификации | Обязательная поддержка технологий автоматической идентификации: RFID (метки и считыватели) |
| Условия эксплуатации | Степень защиты оболочки: не ниже IP54 |
| | Рабочий диапазон температур: от +10 до +35°C |
| | Рабочий диапазон влажности: от 30 до 80% |
| Архитектура | Модульность архитектуры: возможность независимого подключения/отключения функциональных модулей (складской модуль, модуль отчетности, модуль интеграции и т.д.) |
| | Масштабируемость: возможность увеличения количества пользователей и объема учитываемого инструмента без критического изменения архитектуры |
| Требования к интеграции | |
| Бесшовная интеграция с корпоративными системами | Обмен данными с ERP-системой (заказы на инструмент, данные по себестоимости, номенклатура) |
| | Обмен данными с MES-системой (производственные задания, информация о рабочих центрах, привязка инструмента к операциям) |
| | Наличие API (REST, SOAP) для организации обмена данными |

На заключительном этапе исследований планируется создание функционального прототипа АСУИ для проведения тестирования и апробации в реальных производственных условиях, результаты которого будут использованы для уточнения и корректировки разработанных требований, а также для оценки эффективности и экономической целесообразности внедрения АСУИ на машиностроительных предприятиях.

Полученные результаты и их обсуждение

В результате проведенных работ была разработана модель модульного инструментального шкафа для АСУИ, соответствующая требованиям, представленными в табл. 3. В основе системы заложена модульная организация внутреннего пространства с регулируемыми направляющими и выдвижными ящиками различных размеров, что позволяет оптимально размещать инструмент любого типа. Ящики оборудованы плавно выдвигающимися направляющими с доводчиками и системой фиксации, предотвращающей случайное выпадение инструмента.

Система безопасности включает кодовый электронный замок, датчики наличия инструмента в ячейках и контроль доступа через сенсорную панель управления. Для управления был выбран микрокомпьютер Raspberry Pi.

Разработанная система хранения представляет

собой инструментальный шкаф, где 1 – дисплей, 2 – выдвижные стеллажи для инструментальных наладок, 3 – ящики для цельнометаллического инструмента, 4 – ящики для сменных пластин, 5 – считыватель данных с RFID-метки (рис. 2).

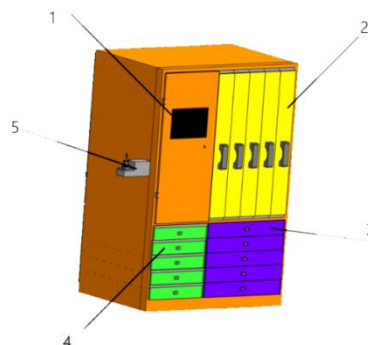


Рис. 2. Система хранения инструмента
Fig. 2. Tool storage system

Внутренние модули разработанного шкафа представляют с собой модульные конструкции (рис. 3, 4). Так как конструкция модульная, соответственно, ящики под комплектующие имеют разные габариты и могут быть заменены исходя из потребностей конкретного производственного участка.

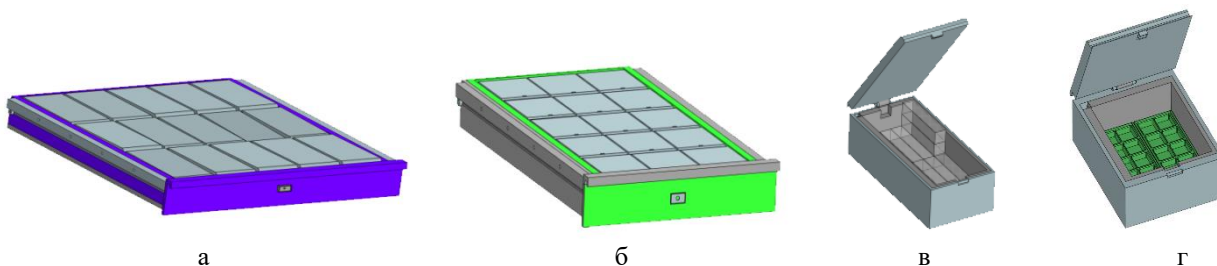


Рис. 3. Модели и внешний вид ящиков и ячеек: а – ящик для ячеек с режущим инструментом; б – ящик для ячеек со сменными пластинами; в – ячейка для режущего инструмента; г – ячейка для сменных пластин

Fig. 3. Models of boxes and cells appearance: а is a box for cells with a cutting tool; б is a box for cells with replaceable plates; в is a cell for cutting tools; г is a cell for replaceable plates

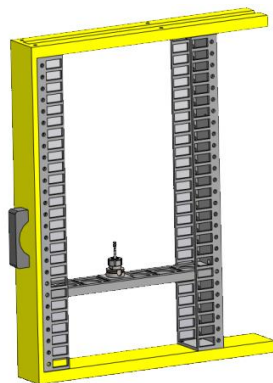


Рис. 4. Выдвижной стеллаж для инструментальных наладок
Fig. 4. Pull-out rack for tool setups

Алгоритм функционирования системы (рис. 5) реализован следующим образом: работа системы начинается с процедуры загрузки и последующей авторизации пользователя. Уровень доступа к функционалу системы определяется правами пользователя, и после успешной авторизации на дисплее отображается соответствующее меню выбора. В процедуре выгрузки инструмента пользователь выбирает необходимые позиции на дисплее, после чего система активирует соответствующие замки и индикаторы для облегчения поиска. Пользователь извлекает инструмент, и после закрытия ящика или стеллажа пользователь обязан подтвердить факт изъятия на дисплее. В процедуре загрузки инструмента пользователь выбирает операцию: добавление нового инструмента или обновление информации о существующем. Производится сканирование метки инстру-

мента для добавления в базу данных или обновления существующих записей. Система анализирует базу данных для определения свободной ячейки, затем активирует соответствующие замки и индикаторы для обозначения расположения ячейки. После загрузки инструмента пользователь закрывает ящик или стеллаж и обязан подтвердить факт загрузки на дисплее. Для обеспечения точного учета и предотвращения потерь система ведет электронный журнал, в котором фиксируются все операции с инструментом, включая информацию о пользователе, идентификатор инструмента, дату и время операции.

На данный момент программа представляет собой базу данных об инструментах (рис. 6). Пользователю доступны такие функции, как внесение конструктивных параметров инструмента, сведения об обрабатываемом материале, стойкость.

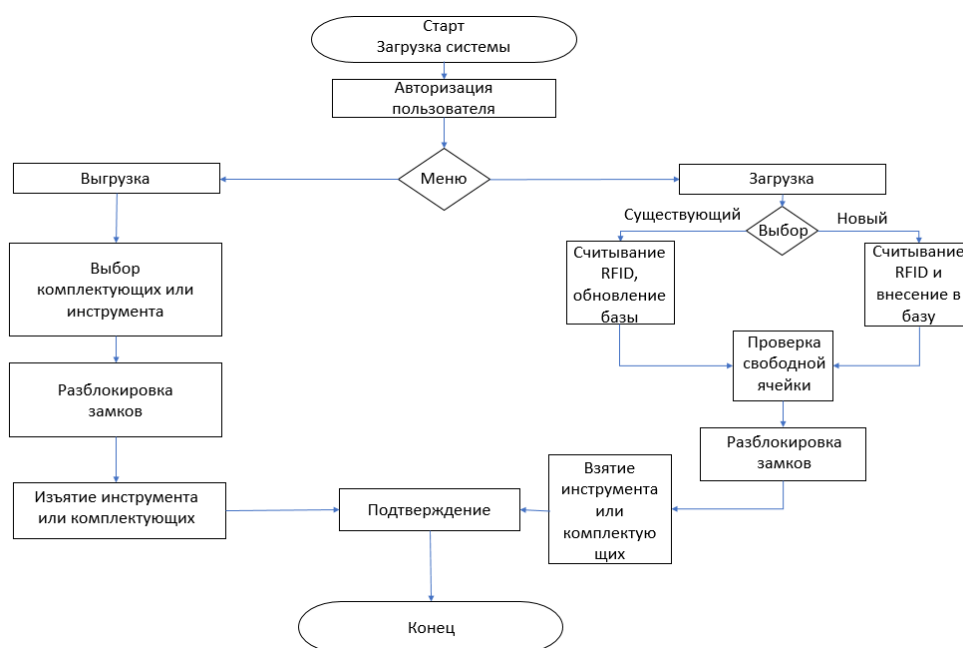


Рис. 5. Алгоритм АСУИ
Fig. 5. Algorithm of the automated tool control system

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|----|-----|-------------------|--------------------|---------|------|-------------|---------------|-----------------------|-----------|-------------------------|------------------------------------|----------|----|----|-----|------------------|----|----|----|
| № | Тип | Наим. инструмента | Количество лубрик. | Диаметр | Угол | Общая длина | Рабочая длина | Валовый или корпусный | Держатель | Обрабатываемый материал | Пластинки или Материал инструмента | Квалитет | Dr | IN | OUT | Остаточное время | | | |
| 1 | 1 | REAMER_D10 | 2 | 10 | 120 | 100 | 30 | Цельный | SK-50 | P | DC6018 | - | 3 | 1 | 1 | 10.33 | | | |
| 2 | 1 | MILL_D30 | 4 | 30 | 90 | 100 | 30 | Корпусный | HSK.63 | P | IA6330 | - | 2 | 0 | 1 | 8.56 | | | |
| 3 | 1 | DRILL_D10 | 2 | 10 | 120 | 100 | 60 | Цельный | HSK.63 | P, H | TiSiN | H10 | 2 | 1 | 0 | 10.50 | | | |
| 4 | 1 | REAMER_D10_K | 3 | 10 | 90 | 90 | 35 | Цельный | SK-50 | P, K | TCGT | - | 1 | 1 | 1 | 30.31 | | | |
| 5 | 1 | MILL_D30_K | 4 | 30 | 90 | 80 | 24 | Корпусный | SK-50 | K | IA6330 | - | 1 | 0 | 1 | 50.23 | | | |
| 6 | 1 | DRILL_D20 | 2 | 20 | 120 | 120 | 60 | Корпусный | SK-50 | N | TiAlSiN | H8 | 1 | 1 | 1 | 10.47 | | | |
| 7 | 1 | MILL_D30_S | 4 | 30 | 90 | 90 | 50 | Цельный | HSK.63 | S | IA6325 | - | 1 | 1 | 0 | 10.45 | | | |
| 8 | 1 | REAMER_D8 | 2 | 8 | 120 | 100 | 30 | Корпусный | HSK.63 | P, S, M | TCGT | - | 1 | 1 | 1 | 10.47 | | | |
| 9 | 1 | DRILL_D12 | 2 | 12 | 120 | 421 | 242 | Корпусный | SK-40 | P | P6M5KB | H10 | 1 | 1 | 1 | 8.56 | | | |
| 10 | 1 | MILL_D50 | 4 | 50 | 90 | 120 | 20 | Цельный | HSK.63 | S, H | IA6325 | - | 1 | 0 | 1 | 23.31 | | | |
| 11 | 1 | REAMER_D10_S | 2 | 10 | 90 | 100 | 50 | Корпусный | HSK | P, S, K | DC6018 | - | 1 | 1 | 1 | 10.30 | | | |
| 12 | 1 | MILL_D40 | 2 | 40 | 45 | 50 | 10 | Корпусный | SK-40 | P, S | YG602 | - | 1 | 1 | 0 | 40.29 | | | |
| 13 | 1 | MILL_D30_N | 2 | 30 | 90 | 75 | 50 | Корпусный | SK50 | N | YG602 | - | 1 | 1 | 1 | 11.35 | | | |
| 14 | 1 | DRILL_D10_N | 2 | 10 | 120 | 120 | 100 | Корпусный | HSK.63 | N | P6M5KB | H8 | 1 | 1 | 1 | 10.34 | | | |
| 15 | 1 | MILL_D10 | 4 | 10 | 90 | 100 | 50 | Цельный | HSK.63 | N | TiAlSiN | - | 1 | 1 | 0 | 11.35 | | | |

Рис. 6. База данных
Fig. 6. Database

Заключение

В результате работы создана система автоматического учета и хранения инструмента, которая представляет собой комплексное решение для современного машиностроительного производства.

Данная система позволит обеспечить не только сохранность дорогостоящего оснащения, но оптимизировать ключевые производственные показатели. Система точного учета позволит сократить потери инструмента, а автоматизация процессов выдачи сократит временные затраты. При этом анализ существующих рыночных решений показывает их существенные ограничения в части функциональности и интеграционных возможностей.

Особенностью решения АСУИ является ее масштабируемость и возможность к интеграции в цифровую экосистему предприятия, включая подключение к ERP- и MES-системам. В дальнейшем интеграция с облачными платформами по аналогии с Vlynk [12] позволит реализовать мобильный мониторинг состояния инструмента без прямого доступа к ERP-системам.

Перспективы развития платформы связаны с внедрением технологий предикативной аналитики для прогнозирования износа инструмента и реализацией функций автоматического пополнения запасов. Эти усовершенствования позволят перевести управление инструментальным хозяйством на качественно новый уровень, обеспечивая предприятиям дополнительное конкурентное преимущество в условиях высокотехнологичного производства.

Список источников

1. Бобков А.Н. Системный подход к организации инструментального хозяйства // Научный журнал СПбГПУ. 2024. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id24-67
2. Ostojic G., Tadic B., Luzanin O. An integral system for automated cutting tool selection // Scientific Research and Essays. 2011, vol. 6, no. 15, pp. 3240–3251.
3. Лазарев А.Ю., Лисицин В.Н., Трушин Н.Н. Принципы эффективного управления инструментальным обеспечением станочного парка машиностроительного предприятия // Известия ТулГУ. Технические науки. 2022. Вып. 6. С. 215–224.
4. Истоцкий В.В., Юдин С.В. Инструментальное производство: проблемы и пути решения // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. Вып. 3. С. 219–226. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-3-219-226.
5. Khan Z., Ahmed M.B. Advancements in Automated Storage and Retrieval Systems: A Comprehensive Review // Robotics & Automation Engineering Journal. 2025, vol. 6, no. 3, art. 555684. DOI: 10.19080/RAEJ.2025.06.555684.
6. Смагин А.С. Построение базы данных режущего инструмента в АСТПП // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2008. №48. С. 130–135.
7. ГОСТ 34.602-89. Техническое задание на создание автоматизированной системы. Введ. 01.01.1990. М.: Стандартинформ, 1989. 24 с.

8. ГОСТ Р 51672-2000. Метрологическое обеспечение испытаний продукции для целей подтверждения соответствия. Основные положения. Введ. 2001-07-01. М.: Госстандарт России, 2000. 12 с.
9. ГОСТ 12.2.003-91. Система стандартов безопасности труда. Оборудование производственное. Общие требования безопасности. Введ. 1992-07-01. М.: Изд-во стандартов, 1991. 8 с.
10. Пат. RU186382 U1 Российская Федерация, МПК В25Н 3/02. Автоматизированный ящик для хранения инструмента / А.Е. Анищенков, В.А. Борисов, С.В. Турченко, В.Я. Обушников; патентообладатель АО «ФНПЦ "ПО "Старт" им. М.В. Проценко». № 2018100922; заявл. 10.01.2018; опубл. 17.01.2019.
11. Pat. US8554364 B2 United States, MPC G06F 17/00, A47B 88/00. Apparatus for securing drawer contents / William K. Holmes, Kent V. Savage, Charles A. Tyack; assignee and patent holder SupplyPro, Inc. (US). № 10/636,368; заявл. 07.08.2003; приоритет 07.08.2002, № 60/401,832; опубл. 08.10.2013.
12. Салихов Р.Б., Гаскарова А.А., Важаев К.В. Разработка автоматизированной системы экологического мониторинга с применением технологий IoT // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2023. Вып. 2. С. 67–72.

References

1. Bobkov A.N. System approach to the organization of the tool department. *Nauchnyy zhurnal SPbGPU* [Scientific Journal of St.Petersburg Polytechnic University]. 2024. (In Russ.) DOI: 10.18720/SPBPU/2/id24-67
2. Ostojic G., Tadic B., Luzanin O., Stankovski S., Vukelic D., Budak I., Miladinovic L. An integral system for automated cutting tool selection. *Scientific Research and Essays*. 2011;6(15):3240-3251.
3. Lazarev A.YU., Lisitsin V.N., Trushin N.N. Efficient tool management for manufacturing companies. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya Tula State University. Technical Sciences]. 2022; 6: 215-224. (In Russ.)
4. Istotskiy V.V., Yudin S.V. Toolmaking: challenges and solutions. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya Tula State University. Technical Sciences]. 2021;3:219-226. (In Russ.) DOI: 10.24412/2071-6168-2021-3-219-226.
5. Khan Z., Ahmed M.B. Advancements in Automated Storage and Retrieval Systems: A Comprehensive Review. *Robotics & Automation Engineering Journal*. 2025;6(3). Art. 555684. DOI: 10.19080/RAEJ.2025.06.555684.
6. Smagin A.V. Construction of a cutting tool database in planner-oriented system. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Scientific and technical bulletin of information technologies, mechanics and optics]. 2008;(48):130-135. (In Russ.)
7. State standard GOST 34.602-89. Information technology. Set of standards for automated systems. Technical directions for automated system making. Moscow: Standartinform, 1989, 24 p. (In Russ.)
8. State standard GOST R 51672-2000. Metrological ensuring of product testing for the assurance of conformity. General principles. Moscow: State Standard of Russia, 2000, 12 p. (In Russ.)
9. State standard GOST 12.2.003-91. Occupational safety standards system. Industrial equipment. General safety

- requirements. Moscow: Standards Publishing House, 1991, 8 p. (In Russ.)
10. Anishchenkov A.E., Borisov V.A., Turchenko S.V., Obushnikov V.Ya. Automated tool storage box. Patent RU, no. 186382 U1, 2019.
11. Holmes William K., Savage Kent V., Tyack Charles A. Apparatus for securing drawer contents. Patent US, no. 8554364 B2, 2013.
12. Salikhov R.B., Gaskarova A.A., Vazhdaev K.V. Development of an automated system for environmental monitoring using IoT technologies. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskije nauki* [Izvestiya Tula State University. Technical Sciences]. 2023;2:67-72. (In Russ.)

Поступила 10.10.2025; принята к публикации 05.02.2026; опубликована 31.03.2026
Submitted 10/10/2025; revised 05/02/2026; published 31/03/2026

Магдеев Кирилл Евгеньевич – студент,
Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия.
Email: Kirillg201194@gmail.com. ORCID 0009-0006-0698-9042

Сердюкова Елизавета Александровна – студент,
Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия.
Email: lizaserukova16@gmail.com. ORCID 0009-0006-2809-2527

Пятых Алексей Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств,
Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия.
Email: pyatykhas@ex.istu.edu. ORCID 0000-0002-4116-9190

Kirill E. Magdeev – Student,
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.
Email: Kirillg201194@gmail.com. ORCID 0009-0006-0698-9042

Elizaveta A. Serdyukova – Student,
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.
Email: lizaserukova16@gmail.com. ORCID 0009-0006-2809-2527

Aleksey S. Pyatykh – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Technology and Equipment for Mechanical Engineering Production,
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.
Email: pyatykhas@ex.istu.edu. ORCID 0000-0002-4116-9190

НАДЕЖНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

RELIABILITY AND DURABILITY OF METALLURGICAL EQUIPMENT

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.3.019.3

DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-1-157-167



РАЗРАБОТКА ИНСТРУМЕНТА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ, ОСНОВАННОГО НА СУПЕРПОЗИЦИИ ФУНКЦИЙ НАДЕЖНОСТИ

Новикова Т.А., Ляпунцова Е.В.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена потребностью отечественных производителей в поиске способов продления сроков службы оборудования машиностроительной отрасли. Данная ситуация обуславливает необходимость разработки инструментов, позволяющих проводить оценку технического состояния оборудования с помощью методов теории надежности. В связи с тем, что оборудование является сложной технической системой, для узлов которой свойственны разные причины отказов, целесообразно использовать суперпозицию нескольких функций надежности. Цель исследования заключается в разработке и апробации программы, которая позволяет проводить первичную предобработку данных, рассчитывать параметры смеси двух распределений, выбирать наиболее подходящую функцию надежности и визуализировать эмпирические и теоретические графики распределений. В исследовании используются методы теории надежности – функции надежности, подчиняющиеся трем унимодальным распределениям: экспоненциальному, нормальному, Вейбулла. При проведении разведывательного анализа данных применяется статистический критерий Граббса для идентификации выбросных значений, а при выборе наиболее подходящей смеси распределений используется критерий минимизации ошибки – метод наименьших квадратов. Разработанная программа написана на языке программирования Python с использованием стандартных для анализа данных библиотек и модулей. Новизна исследования заключается в разработанном комплексном программном продукте, позволяющем проводить полный цикл анализа данных: от создания новых признаков до визуализации результатов исследования. Предлагаемый инструмент позволяет сравнивать с помощью значения невязки как гомогенные смеси двух распределений, так и гетерогенные, что расширяет класс рассматриваемых моделей в задачах надежности. Результатом работы программы является выбранная наиболее подходящая функция надежности, с помощью которой при известной вероятности наступления отказа можно прогнозировать время бесперебойной работы оборудования. Разработанная программа является готовым рабочим инструментом, который может быть полезен инженерам и специалистам в области надежности для адекватной оценки технического состояния оборудования.

Ключевые слова: теория надежности, функция надежности, суперпозиция (смесь) распределений, метод наименьших квадратов, критерий Граббса

© Новикова Т.А., Ляпунцова Е.В., 2026

Для цитирования

Новикова Т.А., Ляпунцова Е.В. Разработка инструмента прогнозирования технического состояния оборудования, основанного на суперпозиции функций надежности // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №1. С. 157-167. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-157-167>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

DEVELOPMENT OF A TOOL FOR PREDICTING EQUIPMENT TECHNICAL CONDITION OF BASED ON THE SUPERPOSITION OF RELIABILITY FUNCTIONS

Novikova T.A., Lyapunsova E.V.

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Abstract. The relevance of this research is determined by the need for domestic manufacturers to find ways to extend the service life of equipment in the mechanical engineering industry. This situation necessitates the development of tools that enable the assessment of the technical condition of equipment using reliability theory methods. Since equipment represents a complex technical system whose components are characterized by different causes of failure, it is advisable to use a superposition of several reliability functions. The aim of the study is to develop and test a program that allows primary data preprocessing, calculation of the parameters for six mixtures of two distributions, selection of the most suitable reliability function, and visualisation of empirical and theoretical distribution graphs. The study uses methods of reliability theory specifically reliability functions that follow three unimodal distributions: exponential, normal, and Weibull. When conducting exploratory data analysis, the Grubbs' test is used to identify outliers, and the least squares method is applied to select the most appropriate mixture distributions by minimizing the approximation error. The developed programme is written in the Python programming language using standard libraries and modules for data analysis. The novelty of the research lies in the development of a comprehensive software product that allows for a full cycle of data analysis: from the creation of new features to the visualisation of research results. The proposed tool allows comparison of both homogeneous mixtures of two distributions and heterogeneous mixtures using the residual error value, which expands the class of models considered in reliability problems. The result of the program's operation is the selection of the most suitable reliability function, which can be used to predict the time of uninterrupted operation of equipment for a given probability of failure. The developed program represents a ready-to-use tool that can be useful for engineers and reliability specialists to adequately assess the technical condition of equipment.

Keywords: reliability theory, reliability function, superposition of distributions, least squares method, Grubbs' test

For citation

Novikova T.A., Lyapunsova E.V. Development of a Tool for Predicting Equipment Technical Condition of Based on the Superposition of Reliability Functions. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 1, pp. 157-167. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-157-167>

Введение

В настоящее время в условиях санкционного давления машиностроительная отрасль в России сталкивается с рядом трудностей. Во-первых, по результатам опроса предприятий, проведенного Банком России в октябре 2024 года, 40 % предприятий работают с предельной загрузкой своих производственных мощностей [1]. Во-вторых, велика доля устаревших (22 %) и аварийных активов (5 %) [1]. При этом коэффициент обновления основных фондов в обрабатывающем производстве в 2024 году составил 5,6, что выше среднего показателя по всем отраслям на 1,4 пунктов [2]. Следовательно, отечественные производители в условиях максимального использования производственных активов работают в двух направлениях. С одной стороны, стараются обновлять основные фонды, но делают это постепенно из-за финансовых трудностей, обусловленных в том числе высокой ключевой ставкой. С другой стороны, ищут способы продлить срок службы парка машин, которые уже находятся на балансе предприятия. Следует

отметить, что процесс увеличения периода, в течение которого оборудование способно выполнять заявленные функции, имеет свои пределы, так как степень износа основных фондов в обрабатывающем производстве составляет более 50 % [2].

Увеличение срока полезного использования парка машин возможно с помощью эффективной организации системы технического обслуживания и ремонта (ТОиР), которая определяет объем и сроки выполнения ремонтных мероприятий. Успешность процесса планирования данных мероприятий зависит от корректной и своевременной оценки технического состояния оборудования, проведение которой возможно с помощью методов теории надежности. Одним из таких методов является использование математической модели – функции надежности, определяющей вероятность безотказной работы системы за некоторое время.

В теории надежности в качестве функции надежности используются различные дискретные и непрерывные распределения. На практике наибольшее распространение получили следующие законы: экспонен-

циальное, нормальное, логнормальное, усеченное нормальное, равномерное, гамма-, биномиальное, геометрическое распределения, а также распределения Вейбулла, Рэлея и Пуассона [3, 4]. Каждое из перечисленных распределений имеет свои достоинства, недостатки и ограничения в области использования.

Например, в период форсированного изнашивания деталей целесообразно применять нормальный, логнормальный законы и закон Вейбулла [4, 5]. На этапе приработки можно использовать распределение Вейбулла и экспоненциальное распределение [5]. В период нормального изнашивания, для которого характерны внезапные отказы, применяется экспоненциальное распределение [3, 5]. Для оценки доли брака в выборочном контроле качества применяют биномиальное распределение, для идентификации отказов в стареющих системах может использоваться гамма-распределение и закон Рэлея, редкие и внезапные отказы случайной величины описываются распределением Пуассона, а для оценки погрешностей измерений возможно применение равномерного закона [5-7]. Таким образом, одиночные распределения, имеющие наибольшее практическое применение, невозможно использовать на разных этапах изнашивания деталей.

Следует отметить, что некоторые распределения не учитывают износ оборудования (равномерное, экспоненциальное, Пуассона, геометрическое), некоторые сложны при расчетах и интерпретации параметров (усеченное нормальное, логнормальное, гамма, Вейбулла). Кроме того, большинство перечисленных распределений (кроме равномерного) являются унимодальными (имеют одно значение моды), при этом эмпирические данные могут быть многомодальными. Ситуация, при которой реальные данные имеют несколько мод, может быть связана со следующими факторами. Во-первых, в рамках одной партии оборудования возможна гетерогенность, обусловленная разными поставщиками комплектующих, ремонтными бригадами, условиями и периодами эксплуатации. Во-вторых, оборудование машиностроительного комплекса является сложной технической системой, состоящей из различных деталей, узлов, агрегатов, каждый из которых имеет свою природу отказов, вызванных различными причинами (внезапные, постепенные, механические, электрические, связанные с условиями эксплуатации). Таким образом, ни одно унимодальное распределение не обеспечивает удовлетворительного соответствия эмпирическим данным, в связи с чем возникает ограниченность использования данных моделей на практике.

Для преодоления вышеописанных особенностей реальных данных может использоваться суперпозиция (смесь) нескольких функций надежности, которая представляет собой линейную комбинацию нескольких распределений. Плотность распределения суперпозиции можно найти по формуле [8]

$$\Phi(t) = \sum_{i=1}^k c_i \cdot f_i(x), \quad (1)$$

где $f_i(x)$ – плотности распределения известных функций надежности; c_i – доля i -й плотности в суперпозиции, $\sum_{i=1}^k c_i = 1$.

При использовании суперпозиции каждый компонент взвешенной суммы может описывать конкретную причину отказа или определенную фазу изнашивания деталей, что позволяет нивелировать ограниченность применения унимодальных распределений.

Практическое применение суперпозиции описано в следующих исследованиях. Одной из первых работ по данной тематике является работа Кубарева А.И., в которой рассмотрена методика оценки параметров суперпозиционных законов методом разложения [9]. Особенности расчета параметров суперпозиции двух наиболее популярных распределений (нормального и экспоненциального, двух нормальных законов, двух законов Вейбулла, нормального закона и закона Вейбулла) представлены в работе Ставровского М.Е. [10]. В статье Артюшенко В. М. и Брускова А. А. для оценки надежности космических аппаратов предлагается использовать параметрическую модель, включающую несколько распределений Вейбулла и позволяющую описывать сложные технические системы со скрытыми внутренними дефектами [11]. Исследование Садыхова Г.С. и Кудрявцевой С.С. подтверждает расчет показателей надежности невозстанавливаемых изделий, функция надежности которых подчиняется суперпозиции двух экспоненциальных распределений [12]. Следует отметить, что подобное исследование – оценка надежности системы с учетом периода приработки с использованием смеси двух экспоненциальных законов – было проведено Бабаевым С.Г. Кроме того, Бабаевым С.Г. рассматривается оценка параметров суперпозиционной функции с помощью метода моментов в ситуации, когда аналитический вид функции распределения неизвестен [8]. Продолжением данного исследования являются работы Федотовой И.М., Вайнштейна В.И., Вайнштейна Ю.В. и Цибульско-го Г.М., в которых разработан алгоритм точечного оценивания методом моментов неизвестных параметров в смесях, образованных двумя или тремя распределениями (экспоненциальным, Эрланга, Рэлея, Максвелла) [13]. В результате проведенного анализа публикаций можно сделать вывод о том, что ни одно из исследований не предлагает математические выкладки для более чем четырех видов гетерогенных распределений. Кроме того, во всех работах, кроме работы Ставровского М.Е., рассматриваются гомогенные смеси (суперпозиция двух экспоненциальных законов, суперпозиция двух законов Вейбулла или суперпозиция n законов Эрланга, Рэлея, Максвелла).

Необходимо отметить, что указанные ученые в области надежности подчеркивают сложность оценки параметров суперпозиционной функции. Кубарев А.И. отмечает, что оценка параметров смеси функции по эмпирическим данным может быть затруднительной из-за многопараметричности данной функции [9]. Бабаев С.Г. отмечает, что наибольшей проблемой при оценке параметров суперпозиционных законов распределений является определение доли (C_i) каждой функции в суперпозиции [8]. Федотова И.М., Вайнштейн В.И., Вайнштейн Ю.В. и Цибульский Г.М. подчеркивают, что оценка параметров суперпозиции усложняется при решении задачи расщепления смеси, при которой необходимо определить как вид распределений, входящих в смесь, так и их количество [13]. В связи с этим Ефремов Л.В. подчеркивает, что решение задачи суперпозиции практически невозможно без использования программных средств [14].

Следовательно, актуальной является разработка программного продукта, способного рассчитывать параметры смеси двух распределений, которые определяются путем комбинации трех наиболее популярных законов: экспоненциального, нормального, Вейбулла. Предлагаемый инструмент позволит из шести функций надежности выбрать одну смесь, которая максимально точно описывает эмпирические данные. Необходимо добавить, что на практике первичные данные об отказах оборудования могут включать в себя выбросные и пропущенные значения, которые требуют предварительной обработки перед включением признаков в математическую модель. В связи с этим целесообразно предусмотреть модуль, который будет выполнять разведочный анализ данных. Кроме того, следует разработать модуль, с помощью которого можно визуализировать полученные результаты.

Таким образом, целью данного исследования является разработка и апробация алгоритма, реализо-

ванного в виде программы для ЭВМ и способного проводить первичную предобработку данных, рассчитывать параметры шести смесей распределений, выбирать наиболее подходящую суперпозиционную функцию и визуализировать итоговое решение.

Материалы и методы исследования

Разработка программы выбора наиболее подходящей функции надежности, подчиняющейся суперпозиции двух распределений, была реализована с помощью одного из самых популярных языков программирования в области анализа данных – Python (версия 3.10.12) и его основных модулей и библиотек (Numpy, Math, Scipy, Pandas, Matplotlib) [15, 16]. Алгоритм разработанной программы представлен на рис. 1. Программа включает в себя три компонента-модуля, которые выполняются последовательно, друг за другом.

Для демонстрации работоспособности разработанной программы был использован набор данных, в котором содержится информация о неисправностях трубонарезных станков с ЧПУ QK1327 за три года. Рассматриваемый станок используется для обработки крупногабаритных труб и валов на предприятиях машиностроительной отрасли. Станок предназначен для выполнения высокоточных операций, таких как нарезание резьбы (включая коническую и метрическую), подрезка торцов, проточка канавок и фасонное точение. Характеристики станка позволяют обрабатывать заготовки с максимальным диаметром до 1000 мм и весом до 6000 кг. Ключевыми узлами станка являются основание (станина), коробка подач, шпиндельная бабка, суппорт с резцедержателем и система ЧПУ, управляющая всеми перемещениями. Для определения неисправности конкретного элемента станок оснащен датчиками вибрации, температуры, давления.

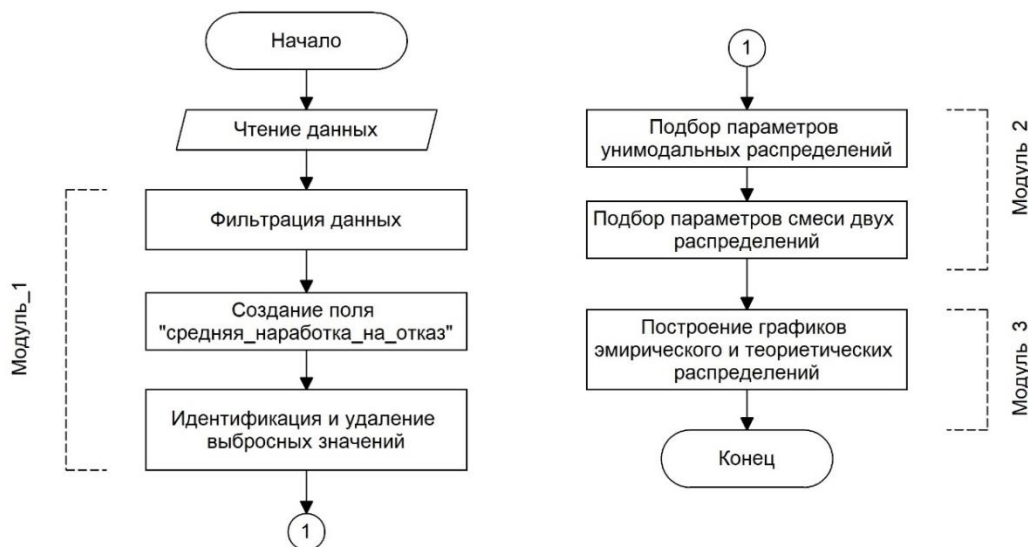


Рис. 1. Алгоритм программы выбора наиболее подходящей функции надежности
 Fig. 1. Algorithm for selecting the most suitable reliability function

В рассматриваемом наборе содержится информация о неисправностях четырех станков. Набор включает в себя 876 записей и 9 полей: идентификатор станка (*machine*), название станка (*machine_name*), идентификатор и наименование узла, в котором произошла неисправность (*unit* и *unit_name* соответственно), тип неисправности (*message_type*), подробное описание неисправности, составленное сотрудником, обслуживающим станок (*notes*), дата начала и окончания простоя оборудования (*begin_date* и *end_date*), код неисправности (*code*) (**рис. 2**).

Следует отметить, что в категориальной переменной «тип неисправности» возможно два значения: неисправности, приводящие к остановке станка (M1), и неисправности, не приводящие к остановке станка (M3). В свою очередь, в переменной, содержащей код неисправности (*code*), возможно четыре варианта значения: технические и технологические, плановые и неплановые. В рамках данного исследования были выбраны все неплановые неисправности (технические и технологические), приводящие к простоям оборудования (M1).

Рассмотрим особенности работы каждого модуля разработанной программы. Первый модуль проводит

разведочный анализ данных, в ходе которого обрабатываются пропущенные значения, идентифицируются и удаляются выбросные значения, создаются новые признаки и формируется набор данных, который можно использовать в математической модели. Во-первых, первоначальный набор фильтруется по двум полям: *message_type* = M1 и *code* = «Технические неплановые» или *message_type* = M1 и *code* = «Технологические неплановые». Во-вторых, создается новое поле – «время безаварийной работы станка» (*uptime_period_in_days*) как разность между датой окончания и начала простоя оборудования: $uptime_period_in_days = end_date - begin_date$.

В-третьих, проводится предварительная работа, необходимая для исключения из выборки выбросных значений для поля «время безаварийной работы станка», – создаются индексы строк. Следует отметить, что в теории анализа данных для принятия решения о необходимости удаления выбросных значений часто используется диаграмма размаха. На **рис. 3** построены подобные диаграммы для каждого из станков, на которых явно определяются выбросные значения.

| machine | machine_name | unit | unit_name | message_type | notes | begin_date | end_date | code |
|---------|--------------------------|------------------|----------------------------------|--------------|---|---------------------|---------------------|------------------------|
| 0 | ТОКАРНЫЙ СТАНОК С ЧПУ №1 | TURN-0015-SP-01 | ГЛАВНЫЙ ШПИНДЕЛЬ | M1 | аварийный останов: перегрузка шпинделя при рас... | 2019-01-21 0:00:00 | 2019-01-22 0:00:00 | ТЕХНИЧЕСКИЕ НЕПЛАНОВЫЕ |
| 1 | ТОКАРНЫЙ СТАНОК С ЧПУ №2 | TURN-0032-TS-01 | СИСТЕМА ПОДАЧИ И СЖАТОГО ВОЗДУХА | M3 | падение давления воздуха, останов подачи охлаж... | 2019-01-21 12:26:08 | 2019-02-25 0:00:00 | ТЕХНИЧЕСКИЕ НЕПЛАНОВЫЕ |
| 2 | ТОКАРНЫЙ СТАНОК С ЧПУ №3 | TURN-0058-CS-01 | СИСТЕМА ЧПУ SINUMERIK 840D | M3 | сбой загрузки управляющей программы, требует п... | 2019-01-21 15:35:26 | 2019-01-23 11:00:00 | ТЕХНИЧЕСКИЕ НЕПЛАНОВЫЕ |
| 3 | ТОКАРНЫЙ СТАНОК С ЧПУ №4 | TURN-0074-TP-01 | ЛЮНЕТ ПОДВИЖНЫЙ | M1 | ошибка позиционирования люнета, датчик предела... | 2019-02-21 16:33:00 | 2019-02-22 0:00:00 | ТЕХНИЧЕСКИЕ НЕПЛАНОВЫЕ |
| 4 | ТОКАРНЫЙ СТАНОК С ЧПУ №1 | TURN-0015-LUB-01 | СИСТЕМА ЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ СМАЗКИ | M1 | авария по низкому уровню масла в системе смазк... | 2019-03-07 16:36:01 | 2019-03-08 15:35:26 | ТЕХНИЧЕСКИЕ НЕПЛАНОВЫЕ |

Рис. 2. Пример данных, представленных в наборе

Fig. 2. An example of the data presented in the set

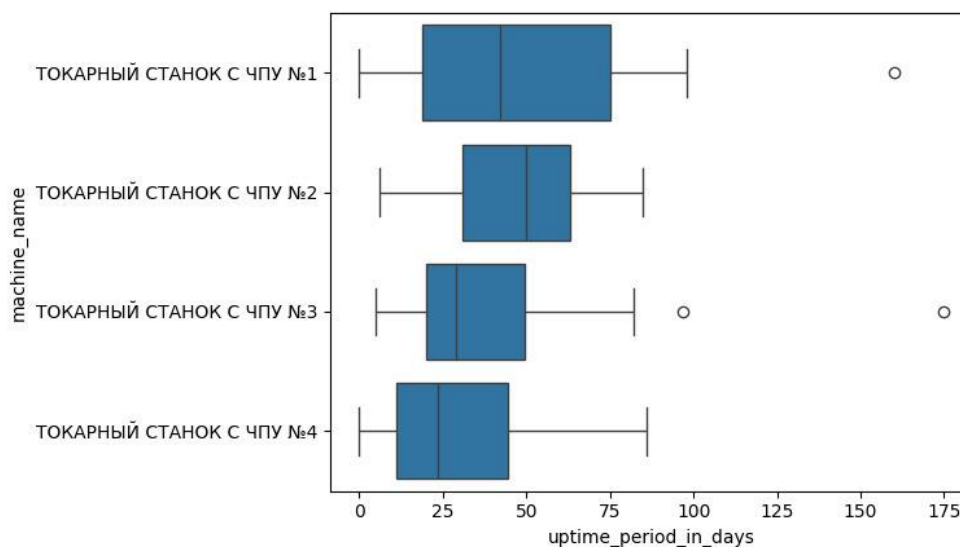


Рис. 3. Диаграмма размаха времени безотказной работы станков

Fig. 3. Box plot of machine uptime

Использование диаграммы размаха в автоматизированном анализе данных без визуального контроля со стороны исследователя является затруднительным, в связи с чем в разработанном модуле выбросные значения определяются с помощью критерия Граббса. Нулевая гипотеза для данного статистического теста предполагает, что в рассматриваемом наборе нет выбросных значений. Альтернативная гипотеза формулируется исходя из предположения, что не менее одного выбросного значения присутствует в рассматриваемой выборке. С помощью данного критерия можно идентифицировать значения, значительно отличающиеся от среднего. Данная процедура необходима в связи с потенциальным искажением статистик в результате проведения анализа при наличии выбросных значений. Критерий Граббса определяет максимальное абсолютное отклонение величины от выборочно-среднего, нормированное на среднеквадратичное отклонение [17]:

$$G = \frac{\max |X_i - \bar{X}|}{\sigma}, \quad (2)$$

где \bar{X} – выборочное среднее; X_i – i -е значение выборки; σ – среднее среднеквадратичное отклонение.

В-четвертых, в рамках работы первого модуля удаляются значения переменной «время безаварийной работы станка», связанные с некачественно проведенным ремонтом. Критерием для удаления является предположение о том, что если неисправность повторилась в течение суток после проведения ремонтных мероприятий – она не была полностью устранена, что привело к повторной остановке станка. В-пятых, формируется новый набор данных, содержащий два столбца (наименование станка и время безаварийной работы станка), который подается в качестве входных параметров для второго модуля.

Основное назначение второго модуля разработанной программы заключается в выборе наиболее подходящей функции надежности. Во-первых, рассчитываются параметры трех унимодальных распределений: экспоненциального, нормального и Вейбулла. В данном исследовании принято допущение о том, что тип распределений, входящих в суперпозиционную функцию, описывается одной из указанных функций. Определение параметров происходит с помощью встроенного метода `fit()`, который можно загрузить из стандартной библиотеки `scipy.stats`. Данный метод подбирает параметры теоретического распределения, которые наилучшим образом описывают эмпирические данные с помощью критерия максимального правдоподобия. Для выбранных распределений необходимо оценить следующие параметры: для экспоненциального закона – интенсивность или обратный коэффициент масштаба ($1/\lambda$) и коэффициент сдвига (μ); для нормального закона – коэффициент сдвига (μ) и коэффициент масштаба (σ); для зако-

на Вейбулла – коэффициент масштаба (λ), коэффициент формы (k) и коэффициент сдвига (μ).

Во-вторых, подбираются параметры суперпозиции двух распределений, которые могут быть представлены в виде формулы

$$F_{mix} = p \cdot func_1 + q \cdot func_2, \quad (3)$$

где p – вес первой функции распределения в смеси; $q = (1 - p)$ – вес второй функции распределения в смеси; $func_1$ и $func_2$ – первая и вторая функции надежности.

Для определения параметров смеси была разработана пользовательская функция `fit_mixture()`, для которой в качестве аргументов передаются следующие переменные: массив данных (`data`), первое распределение ($func_1$), второе распределение ($func_2$), начальные параметры (`initial_guess`).

В качестве массива данных используется значение переменной «время безаварийной работы станка» (`uptime_period_in_days`), рассчитанное в первом модуле программы. Пара распределений ($func_1$ и $func_2$) определяется перебором возможных комбинаций трех унимодальных законов. Рассчитываются параметры следующих суперпозиционных функций: смесь двух экспоненциальных законов, смесь экспоненциального и нормального законов, смесь экспоненциального закона и закона Вейбулла, смесь двух нормальных законов, смесь нормального закона и закона Вейбулла, смесь двух законов Вейбулла.

Начальные параметры включают в себя вес каждого компонента смеси (p , q) и параметры унимодальных распределений, входящих в смесь (коэффициент сдвига, масштаба, формы), которые были определены на предыдущем этапе. Следует отметить, что начальные значения весов для разных законов ($func_1 \neq func_2$) равны ($p = q = 0,5$), в то время как для смеси гомогенных законов ($func_1 = func_2$) начальные значения весов задаются следующим отношением: $p = 0,25$ и $q = 0,75$.

Для определения параметров наиболее подходящей смеси необходимо выбрать критерий минимизации ошибки расхождения теоретической и эмпирической функций распределения. В качестве такого критерия был выбран метод наименьших квадратов (МНК), который подразумевает минимизацию суммы квадратов разности значений эмпирического и теоретического распределений:

$$\sum_{i=1}^i (F_{mix}(t_i) - e_i)^2, \quad (4)$$

где e_i – значение эмпирической функции распределения для i -го элемента набора данных; $F_{mix}(t_i)$ – значение теоретической функции смеси для i -го элемента.

Для минимизации суммы используется встроенная функция `minimize` из библиотеки `scipy.optimize`, в которую необходимо передать значения целевой функции (`residuals` – сумма квадратов разности), начальные параметры (`initial_guess`), область возможных значений параметров (`bounds`) и алгоритм оптимизации (`method`). В данной работе в качестве алгоритма оптимизации используется встроенный в `scipy.optimize` квазиньютоновский метод L-BFGS-B.

Таким образом, для всех станков определяются параметры шести смесей двух распределений, рассчитывается значение невязки и выбирается наиболее подходящая смесь, для которой значение невязки минимально. Следует отметить, что под невязкой понимается разница между фактическим наблюдаемым значением и значением, спрогнозированным моделью. Результат проведенных расчетов аккумулируется в табличной форме, где указываются значения начальных и подобранных параметров, а также значение невязки для всех смесей и всех станков.

В-третьих, на заключительном этапе работы второго модуля все значения, полученные в результате работы предыдущих шагов, собираются и записываются в словарь.

Третий модуль с помощью встроенного метода `ECDF()` из библиотеки `statsmodels.distributions.empirical_distribution` позволяет построить графики теоретического (подобранная суперпозиционная функция) и эмпирического (реальные данные) распределений. На данном шаге выполнение разработанной программы завершается.

Полученные результаты и их обсуждение

Результатом работы алгоритма, реализованного с помощью программы ЭВМ для рассмотренного набора данных являются следующие данные. Итоговым результатом работы первого модуля программы является набор данных (`dataframe`), включающий два поля: `machine_name` и `uptime_period_in_days`. Результаты выполнения второго модуля программы можно разбить на промежуточные и итоговые. На первом этапе выполнения второго модуля подбираются параметры трех унимодальных распределений, которые используются в качестве первоначальных параметров смеси двух распределений. Результат подбора данных

параметров является промежуточным и представлен на **рис. 4**.

На втором этапе работы второго модуля программы на основе подобранных параметров унимодальных распределений рассчитываются параметры смеси двух распределений. Данные результаты являются итоговыми и представлены в **табл. 1**. Следует отметить, что для примера представлен результат расчетов для первого станка №1. В таблице указано значение веса первой функции (p), значение второй функции в смеси можно рассчитать как разность единицы и веса первой функции ($1 - p$). Если $p = 0$, то смесь вырождается в одну функцию распределения (вторую). Если $p = 1$, то смесь вырождается в одну функцию распределения (первую).

Наиболее подходящая функция надежности для станка №1 описывается смесью нормального распределения и распределения Вейбулла, так как данной смеси соответствует минимальное значение невязки.

Результатом работы третьего модуля программы являются построенные графики эмпирического и теоретических распределений, которые представлены на **рис. 5** для станка №1. На графиках используются следующие обозначения: `ECDF` (от англ. `Empirical Cumulative Distribution Function`) – эмпирическая функция распределения, `Fitting` – теоретическая функция распределения (суперпозиция двух функций).

Следует отметить, что для демонстрации целесообразности использования суперпозиции двух распределений были рассчитаны параметры трех унимодальных распределений для рассматриваемых станков. В **табл. 2** представлены значения функции невязки для всех станков и всех распределений.

Цветом выделены минимальные значения невязки для каждого станка. Можно определить, насколько в среднем лучше суперпозиция двух функций аппроксимирует теоретические данные по сравнению с унимодальным распределением. Для станка №1 точность повышается на 96%, для станков №2-4 – на 82%. Таким образом, использование суперпозиции повышает точность прогноза в среднем на 85%.

Таким образом, для станков №1, 2 и 4 наиболее подходящая функция надежности описывается смесью нормального распределения и распределения Вейбулла, а для станка №3 – смесью двух распределений Вейбулла.

| | <code>machine_name</code> | <code>expon_loc</code> | <code>expon_scale</code> | <code>norm_loc</code> | <code>norm_scale</code> | <code>weibull_c</code> | <code>weibull_loc</code> | <code>weibull_scale</code> |
|---|---------------------------|------------------------|--------------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|----------------------------|
| 0 | ТОКАРНЫЙ СТАНОК С ЧПУ №1 | 0.0 | 46.786684 | 47.793684 | 29.659446 | 1.679252 | -3.005898E+00 | 55.619061 |
| 1 | ТОКАРНЫЙ СТАНОК С ЧПУ №2 | 0.0 | 35.010526 | 35.010526 | 25.898789 | 1.291301 | -2.970057E-01 | 38.069036 |
| 2 | ТОКАРНЫЙ СТАНОК С ЧПУ №3 | 1.0 | 34.341463 | 35.341463 | 22.347161 | 1.612871 | 5.821181E-04 | 39.433547 |
| 3 | ТОКАРНЫЙ СТАНОК С ЧПУ №4 | 0 | 29.322222 | 29.322222 | 22.781975 | 0.670072 | -5.612590E-25 | 19.111894 |

Рис. 4. Результат расчета параметров трех унимодальных распределений
Fig. 4. The result of calculating the parameters of three unimodal distributions

Таблица 1. Результаты работы второго модуля для станка №1
 Table 1. Results of the second module for machine №1

| Начальные приближения | | | Подобранные параметры | | | Значение невязки |
|--|---|--|-----------------------|--|--|------------------|
| Вес | Параметры 1-го распределения | Параметры 2-го распределения | Вес | Параметры 1-го распределения | Параметры 2-го распределения | |
| Аппроксимация смесью экспоненциальное + экспоненциальное | | | | | | |
| $p = 0,25$ | $\mu = 0$ $\frac{1}{\lambda} = 23,39$ | $\mu = 0$ $\frac{1}{\lambda} = 70,18$ | $p = 0,46$ | $\mu = 0$ $\frac{1}{\lambda} = 48,43$ | $\mu = 10,57$ $\frac{1}{\lambda} = 48,42$ | 0,32 |
| Аппроксимация смесью экспоненциальное + нормальное | | | | | | |
| $p = 0,5$ | $\mu = 0$ $\frac{1}{\lambda} = 46,79$ | $\mu = 47,76$ $\sigma = 29,66$ | $p = 0,74$ | $\mu = 4,47$ $\frac{1}{\lambda} = 33,61$ | $\mu = 76,72$ $\sigma = 6,68$ | 0,02 |
| Аппроксимация смесью экспоненциальное + Вейбулла | | | | | | |
| $p = 0,5$ | $\mu = 0$ $\frac{1}{\lambda} = 46,79$ | $k = 1,68$ $\mu = -3,01$ $\lambda = 55,62$ | $p = 0,74$ | $\mu = 4,33$ $\frac{1}{\lambda} = 34,14$ | $k = 11,54$ $\mu = 9,58$ $\lambda = 69,48$ | 0,022 |
| Аппроксимация смесью нормальное + нормальное | | | | | | |
| $p = 0,25$ | $\mu = 23,39$ $\sigma = 14,83$ | $\mu = 70,18$ $\sigma = 44,49$ | $p = 0,54$ | $\mu = 20,94$ $\sigma = 13,76$ | $\mu = 75,59$ $\sigma = 13,3$ | 0,037 |
| Аппроксимация смесью нормальное + Вейбулла | | | | | | |
| $p = 0,5$ | $\mu = 46,79$ $\sigma = 29,66$ | $k = 1,68$ $\mu = -3,01$ $\lambda = 55,62$ | $p = 0,26$ | $\mu = 77,14$ $\sigma = 6,89$ | $k = 1,06$ $\mu = 3,56$ $\lambda = 34,47$ | 0,019 |
| Аппроксимация смесью Вейбулла + Вейбулла | | | | | | |
| $p = 0,25$ | $k = 0,84$ $\mu = -1,5$ $\lambda = 27,81$ | $k = 2,51$ $\mu = -4,51$ $\lambda = 83,43$ | $p = 0,57$ | $k = 1,54$ $\mu = 0,1$ $\lambda = 26,49$ | $k = 6,87$ $\mu = 0$ $\lambda = 81,16$ | 0,025 |

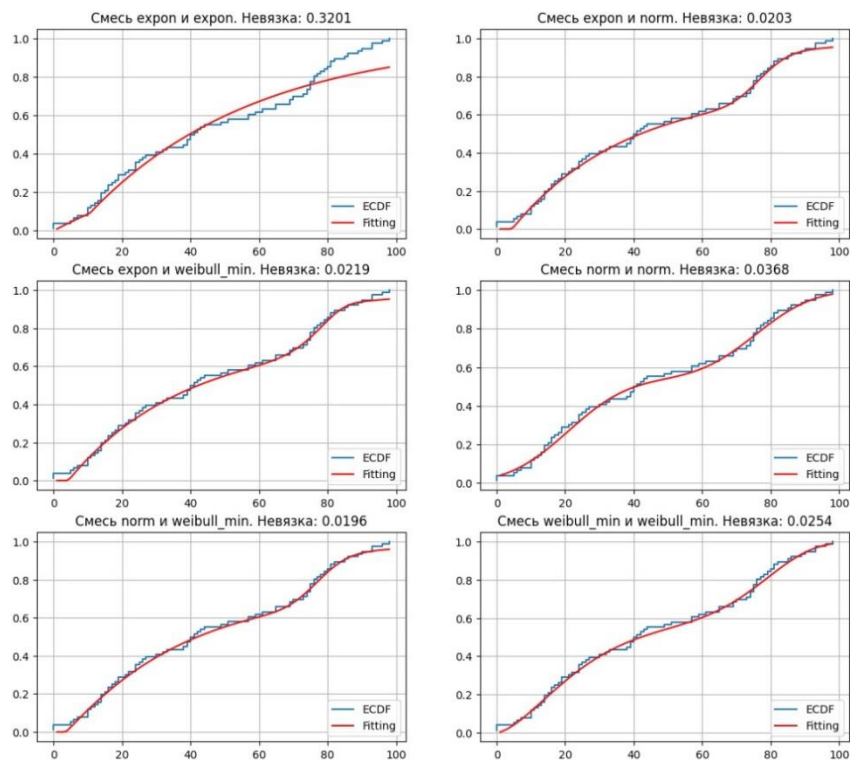


Рис. 5. Графики эмпирического и теоретических распределений для станка №1
 Fig. 5. Graphs of empirical and theoretical distributions for machine №1

Таблица 2. Значение невязки для всех единиц оборудования всех распределений
 Table 2. The residual error value for all equipment units across all distributions

| Функция надежности | Станок №1 | Станок №2 | Станок №3 | Станок №4 |
|-------------------------------------|------------------|-----------|-----------|-----------|
| | Значение невязки | | | |
| Унимодальные распределения | | | | |
| Экспоненциальное | 0,735 | 1,369 | 0,379 | 0,176 |
| Нормальное | 0,511 | 0,063 | 0,371 | 0,238 |
| Вейбулла | 0,447 | 0,062 | 0,087 | 0,085 |
| Суперпозиция двух распределений | | | | |
| Экспоненциальное + экспоненциальное | 0,320 | 0,046 | 0,066 | 0,121 |
| Экспоненциальное + нормальное | 0,020 | 0,014 | 0,030 | 0,019 |
| Экспоненциальное + Вейбулла | 0,022 | 0,014 | 0,071 | 0,017 |
| Нормальное + нормальное | 0,037 | 0,014 | 0,017 | 0,015 |
| Нормальное + Вейбулла | 0,019 | 0,011 | 0,016 | 0,015 |
| Вейбулла + Вейбулла | 0,025 | 0,011 | 0,016 | 0,017 |

При известной функции надежности можно прогнозировать отказ оборудования. В табл. 3 представлены результаты прогнозирования периодов выхода из строя для четырех станков. Следует отметить, что функция надежности прогнозирует момент наступления отказа для заданной вероятности, то есть через N дней наступит отказ с вероятностью A . В качестве данного уровня вероятности было выбрано значение, равное 60%.

Таблица 3. Результаты прогнозирования периодов наступления отказов для четырех станков
 Table 3. Results of predicting failure periods for four machines

| Номер станка | Наиболее подходящая функция надежности | Время бесперебойной работы, дни |
|--------------------------|--|---------------------------------|
| Токарный станок с ЧПУ №1 | Смесь нормального распределения и распределения Вейбулла | 59 |
| Токарный станок с ЧПУ №2 | Смесь нормального распределения и распределения Вейбулла | 54 |
| Токарный станок с ЧПУ №3 | Смесь двух распределений Вейбулла | 33 |
| Токарный станок с ЧПУ №4 | Смесь нормального распределения и распределения Вейбулла | 33 |

При известном времени бесперебойной работы парка оборудования можно планировать объем и частоту ремонтных мероприятий.

Заключение

В рамках проведенного исследования была достигнута поставленная цель – разработана программа, позволяющая выбирать наиболее подходящую функцию надежности, подчиняющуюся законам суперпозиции. Можно выделить две особенности разработанного инструмента. Во-первых, программа интегриру-

ет три модуля: предобработка данных, выбор суперпозиции двух распределений и визуализация полученных результатов. Во-вторых, осуществлена комплексная параметризация и сравнительный анализ шести смесей унимодальных функций надежности (экспоненциальной, нормальной и Вейбулла). Практическая ценность работы подтверждена апробацией программы на реальных данных. Разработанный инструмент может быть использован инженерами и специалистами в области надежности для повышения точности прогнозирования технического состояния оборудования, оптимизации стратегии ТОиР и планирования жизненного цикла изделий.

Список источников

1. Данные опросов /Мониторинг предприятий [Электронный ресурс]. http://www.cbr.ru/Content/Document/File/135603/mp_survey_data.xlsx. Проверено 08.12.2025.
2. Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс]. <https://rosstat.gov.ru>. Проверено 08.12.2025.
3. Литвиненко Р.С., Павлов П.П., Аухадеев А.Э. Практическое применение нормального закона распределения в теории надежности технических систем // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2016. № 4. С. 96-99.
4. Литвиненко Р.С., Идиятуллин Р.Г., Аухадеев А.Э. Анализ использования показательного распределения в теории надежности технических систем // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2016. Т. 1. С. 35-38.
5. Случанинов Н.Н., Федоров И.В., Кошкин С.В. Определение основных показателей надежности функционально-структурных схем механизмов и машин // Специальная техника и технологии транспорта. 2020. № 6(44). С. 161-167.
6. Обоскалов В.П., Кокин С.Е., Кирпикова И.Л. Применение вероятностно-статистических методов и теории графов в электроэнергетике: учеб. пособие. Екатеринбург: УрФУ, 2016. 271 с.

7. Надежность изделий и систем / Велеулов З.А., Кинжагулов И.Ю., Федоров А.В., Фирюлин Д.Р. СПб.: Университет ИТМО, 2023. 184 с.
8. Бабаев С.Г., Габиров И.А., Меликов Р.Х. Основы теории надежности нефтепромышленного оборудования: учебник / под общ. ред. С.Г. Бабаева. Баку: Изд-во АГНА, 2015. 400 с.
9. Кубарев А.И. Надежность в машиностроении. М.: Изд-во стандартов, 1977. 264 с.
10. Основы функционирования систем сервиса: учебник для вузов / М.Е. Ставровский [и др.]; под ред. М.Е. Ставровского. М.: Юрайт, 2025. 190 с.
11. Артюшенко В.М., Брусков А.А. Применение распределения Вейбулла для оценок надежности космических аппаратов // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2024. № 2. С. 89-102.
12. Садыхо Г.С., Кудрявцева С.С. Расчет и оценка показателей надежности невосстанавливаемых объектов при наработках, распределенных как смесь двух экспоненциальных распределений // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2020. Т. 1. С. 29-31.
13. Функция восстановления при наработках с распределениями как смесь n экспоненциальных распределений. Нахождение параметров смесей методом моментов / И.М. Федотова, В.И. Вайнштейн, Г.М. Цибульский, Ю.В. Вайнштейн // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2019. № 3. С. 104-112.
14. Ефремов Л.В. Практика вероятностного анализа надежности техники с применением компьютерных технологий. СПб.: Наука, 2008. 216 с.
15. Усачева А.Б., Галиаскаров Д.Р. Библиотеки Python для анализа данных // Colloquium-Journal. 2020. № 29-1(81). С. 58-59.
16. Ларин С.Э., Белаш В.Ю. Библиотеки Python для анализа данных: предобработка и подготовка данных // Дневник науки. 2023. № 12(84).
17. Ширяева Л.К. О некоторых свойствах распределения двусторонней статистики Граббса // Российская наука: актуальные исследования и разработки: сборник научных статей XI Всероссийской научно-практической конференции. Самара, 25 февраля 2021 года. В 2-х частях. Часть 1. Самара: Самарский государственный экономический университет, 2021. С. 43-47.
5. Sluchaninov N.N., Fedorov I.V., Koshkin S.V. Determination of the main reliability indicators of functional and structural schemes of mechanisms and machines. *Spetsialnaya tekhnika i tekhnologii transporta* [Special equipment and transport technologies]. 2020;(6(44)):161-167. (In Russ.)
6. Oboskalov V.P., Kokin S.E., Kirpikova I.L. *Primenenie veroyatnostno-statisticheskikh metodov i teorii grafov v elektroenergetike: ucheb. posobie* [Application of probabilistic statistical methods and graph theory in the electric power industry: textbook]. Yekaterinburg: Publishing house of UrFU, 2016, 271 p. (In Russ.)
7. Veleulov Z.A., Kinzhagulov I.Yu., Fedorov A.V., Firyulin D.R. *Nadezhnost izdeliy i sistem* [Reliability of products and systems]. Saint Petersburg: Universitet ITMO, 2023, 184 p. (In Russ.)
8. Babaev S.G., Gabibov I.A., Melikov R.X. *Osnovy teorii nadezhnosti neftepromyslovogo oborudovaniya. Uchebnik* [Fundamentals of the theory of reliability of oilfield equipment. Textbook]. Baku: AGNA Publishing house, 2015, 400 p. (In Russ.)
9. Kubarev A.I. *Nadezhnost v mashinostroenii* [Reliability in mechanical engineering]. Standards publishing house, 1977, 264 p. (In Russ.)
10. Stavrovskiy M.E. *Osnovy funktsionirovaniya sistem servisa: uchebnik dlya vuzov* [Fundamentals of the functioning of service systems: textbook for universities]. Moscow: Yurait Publishing house, 2025, 190 p. (In Russ.)
11. Artyushenko V.M., Bruskov A.A. Application of the Weibull distribution for spacecraft reliability estimates. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemnyy analiz i informatsionnye tekhnologii* [Bulletin of Voronezh State University. Series: System analysis and Information Technology]. 2024;(2):89-102. (In Russ.)
12. Sadykhov G.S., Kudryavtseva S.S. Calculation and evaluation of reliability indicators of non-recoverable objects at operating times distributed as a mixture of two exponential distributions. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost i kachestvo»* [Reliability and Quality. Proceedings of the International Symposium]. 2020;1:29-31. (In Russ.)
13. Fedotova I.M., Vainshtein V.I., Tsibulskiy G.M., Vainshtein Yu.V. The recovery function for operating time with distributions as a mixture of n exponential distributions. Finding the parameters of mixtures by the method of moments. *Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin* [Problems of mechanical engineering and machine reliability]. 2019;(3):104-112. (In Russ.)
14. Efremov L.V. *Praktika veroyatnostnogo analiza nadezhnosti tekhniki s primeneniem kompyuternykh tekhnologiy* [The practice of probabilistic reliability analysis using computer technology]. Saint Petersburg: Nauka, 2008, 216 p. (In Russ.)
15. Usacheva A.B., Galiaskarov D.R. Python libraries for data analysis. *Colloquium-Journal* [Colloquium-Journal]. 2020;(29-1(81)):58-59. (In Russ.)
16. Larin S.E., Belash V.Yu. Python libraries for data analysis: data preprocessing and preparation. *Dnevnik nauki* [Diary of science]. 2023;(12(84)). (In Russ.)

References

1. Survey data. *Monitoring predpriyatiy* [Enterprises monitoring]. Available at: http://www.cbr.ru/Content/Document/File/135603/mp_survey_data.xlsx. (Accessed on December 08, 2025).
2. Federal State Statistics Service. Available at: <https://rosstat.gov.ru>. (Accessed on December 08, 2025).
3. Litvinenko R.S., Pavlov P.P., Aukhadeev A.E. Practical application of the normal distribution law in the theory of reliability of technical systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika* [News of higher educational institutions. Electromechanics]. 2016;(4):96-99. (In Russ.)
4. Litvinenko R.S., Idiyattullin R.G., Aukhadeev A.E. Analysis of the use of exponential distribution in the theory of reliability of technical systems. *Trudy mezhdunarodnogo*

17. Shiryayeva L.K. On some properties of the distribution of two-way Grubbs statistics. *Rossiiskaya nauka: aktualnye issledovaniya i razrabotki: Sbornik nauchnykh statey XI Vserossiiskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Russian science: current research and development. Collection of scientific articles of the XI All-Russian Scientific and Practical Conference]. Samara: Samara State University of Economics, 2021, pp. 43-47. (In Russ.)

Поступила 10.12.2025; принята к публикации 17.02.2026; опубликована 31.03.2026
Submitted 10/12/2025; revised 17/02/2026; published 31/03/2026

Новикова Татьяна Алексеевна – аспирант,

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.

Email: boiko_tatjana@mail.ru. ORCID 0000-0003-1734-2827

Ляпунцова Елена Вячеславовна – доктор технических наук, профессор,

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.

Email: lev77@me.com. ORCID 0000-0002-3420-3805

Tatyana A. Novikova – Postgraduate Student,

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia.

Email: boiko_tatjana@mail.ru. ORCID 0000-0003-1734-2827

Elena V. Lyapunsova – DrSc (Eng.), Professor,

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia.

Email: lev77@me.com. ORCID 0000-0002-3420-3805

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И СТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕТАЛЛУРГИИ CONSTRUCTION MATERIALS AND CONSTRUCTION ENGINEERING IN METALLURGY

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 624.075.23
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-1-168-175



ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СИЛЬНО НАГРУЖЕННЫХ ТРУБОБЕТОННЫХ КОЛОНН

Кришан А.Л.¹, Астафьева М.А.¹, Парфенов В.В.², Вавилин Н.В.²

¹Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

²ООО «Структура Эксперт», Екатеринбург, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Увеличивающиеся объемы применения трубобетонных колонн в нашей стране делают все более актуальными для них поиски наиболее эффективных конструктивных решений. **Цель работы.** В качестве вертикальных сильно нагруженных конструкций предлагается использовать трубобетонные колонны круглого сечения, изготовленные с применением трубы из высокопрочной стали класса не менее С440, высокопрочного бетона класса В60 и выше, высокопрочной арматуры класса А600С и выше. Заметно повысить прочность бетонного ядра, а следовательно, и в целом колонн позволяет и дополнительное косвенное армирование. Для этих целей целесообразно использовать спирали из арматуры класса А500С или А600С. **Результат.** Приведены данные расчетов, свидетельствующие о существенном снижении материалоемкости колонны из высокопрочных материалов по сравнению с железобетонной и трубобетонной, не имеющей армирование бетонного ядра. **Практическая значимость.** Предложена упрощенная методика расчета усовершенствованной конструкции трубобетонной колонны, которая может применяться в проектной практике. Данная методика разработана на основе феноменологического подхода и учитывает основные особенности силового сопротивления трубобетонных колонн. В отличие от известных методик, предлагаемых нормативными документами различных стран, она применима для всех классов бетона и арматуры. Кроме того, она позволяет рассчитывать прочность конструкций со спиральным армированием. Методика уже нашла практическое использование при проектировании высотного здания многофункционального комплекса «Деловой центр УГМК», который начали возводить летом 2024 года в центре делового квартала «Екатеринбург-Сити». Техничко-экономические показатели проекта свидетельствуют о высокой эффективности применения трубобетона из высокопрочных материалов в качестве сильно нагруженных колонн. Получено заметное снижение размеров поперечного сечения и расхода основных материалов в случае применения трубобетонных колонн взамен железобетонных. Положительный опыт практического использования трубобетона в высотном строительстве рекомендуется к широкому распространению.

Ключевые слова: трубобетонная колонна, центральное сжатие, прочность, деформативность, высокопрочный бетон, высокопрочная арматура, спиральное армирование

© Кришан А.Л., Астафьева М.А., Парфенов В.В., Вавилин Н.В., 2026

Для цитирования

Эффективность применения сильно нагруженных трубобетонных колонн / Кришан А.Л., Астафьева М.А., Парфенов В.В., Вавилин Н.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №1. С. 168-175. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-168-175>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

EFFICIENCY OF USING HEAVY LOADED CONCRETE FILLED STEEL TUBE COLUMNS

Krishan A.L.¹, Astafieva M.A.¹, Parfenov V.V.², Vavilin N.V.²

¹Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

² LLC Structura Expert, Yekaterinburg, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The increasing use of concrete filled steel tube columns in our country makes it increasingly important to find the most effective structural solutions. **Objectives.** It is proposed to use round-section concrete filled steel tube columns made using pipes made of high-strength steel of at least C440 grade, high-strength concrete of B60 grade and higher, and high-strength reinforcing bars of A600C grade and higher as vertical heavily loaded structures. Additional indirect reinforcement also allows for a noticeable increase in the strength of the concrete core and, consequently, of the columns as a whole. For these purposes, it is advisable to use coils made of A500C or A600C grade reinforcement. **Result.** The calculation data are presented, indicating a significant reduction in the material content of a column made of high-strength materials compared with reinforced concrete and tube-reinforced concrete, which does not have reinforcement of the concrete core. **Practical Relevance.** A simplified calculation method for the improved design of a concrete filled steel tube column is proposed, which can be used in project practice. This method has been developed on the basis of a phenomenological approach and takes into account the main features of the force resistance of the columns. Unlike the well-known methods proposed by regulatory documents of various countries, it is applicable to all grades of concrete and reinforcement. In addition, it allows to calculate the strength of structures with spiral reinforcement. The method has already found practical use in the design of a high-rise building of the multifunctional complex “UMMC Business Center”, which began construction in the summer of 2024 in the center of the Yekaterinburg City business district. The technical and economic indicators of the project show the high efficiency of using tube-reinforced concrete made of high-strength materials as heavily loaded columns. A noticeable reduction in cross-sectional dimensions and content of basic materials has been obtained in the case of using concrete filled steel tube columns instead of reinforced concrete ones. The positive experience has demonstrated that the use of tube-reinforced concrete in high-rise construction is recommended for wide distribution.

Keywords: concrete filled steel tube column, axial compression, strength, deformability, high-strength concrete, high-strength reinforcing bar, spiral reinforcement

For citation

Krishan A.L., Astafieva M.A., Parfenov V.V., Vavilin N.V. Efficiency of Using Heavy Loaded Concrete Filled Steel Tube Columns. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 1, pp. 168-175. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-168-175>

Введение

В мировой практике трубобетонные колонны (ТБК) все чаще применяются при строительстве высотных зданий [1-3]. Широкому использованию ТБК способствуют их многочисленные преимущества [4-10]. Однако в России эти колонны только начинают применять в практике гражданского строительства. Поэтому цель данной публикации – показать эффективность применения трубобетона в качестве сильно нагруженных колонн.

Конструкция ТБК представляет из себя стальную трубу, заполненную бетоном. Для повышения прочности и огнестойкости в бетоне, как правило, размещается продольная арматура (рис. 1).

Узлы сопряжения с перекрытиями могут иметь различную конструкцию. При этом наиболее рациональные варианты предполагают передачу усилий от перекрытия одновременно на стальную трубу и железобетонное ядро, например в случае опирания моно-

литного железобетонного перекрытия с помощью опорного столика, как показано на рис. 2.

За счет повышенной прочности и жесткости ТБК имеют значительно меньшие размеры поперечного сечения по сравнению с железобетонными колоннами. Расчеты показывают, что на нижних этажах здания высотой 300 м железобетонную колонну сечения 2×2 м можно заменить на трубобетонную круглого сечения диаметром 1,32 м. Причем расход металла в колоннах обоих типов примерно одинаков. Такая замена приводит к заметному улучшению планировки помещений. Кроме того, высвобождаются дополнительные полезные площади. Стоимость сдаваемых в аренду помещений в высотных зданиях достаточно высока. Согласно предварительным расчетам, только за счет дополнительных площадей от замены колонн на трубобетонные в проектируемом в Москве здании высотой 300 м годовая прибыль составит порядка 318,6 млн руб.

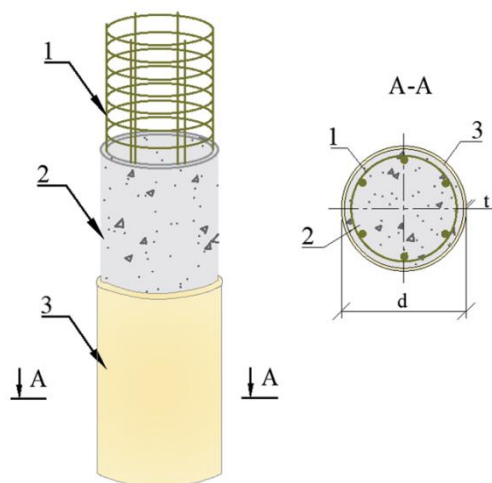


Рис. 1. Ствол трубобетонной колонны:
1 – спиральное армирование; 2 – бетонное ядро; 3 – стальная труба
Fig. 1. Shaft of the concrete filled steel tube column:
1 is spiral reinforcement; 2 is concrete core;
3 is steel tube

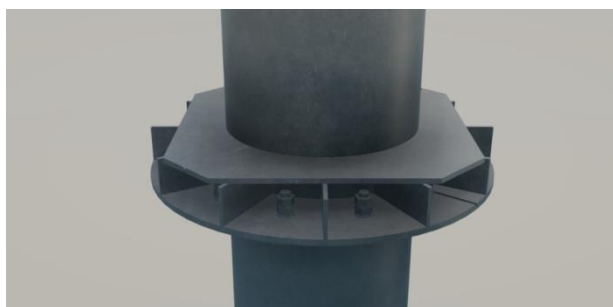


Рис. 2. Опорный столик трубобетонной колонны
Fig. 2. Support table of the concrete filled steel tube column

Существенную прибыль можно получить и за счет сокращения сроков возведения несущих каркасов зданий. В Екатеринбурге сейчас возводится высотный multifunctional комплекс, непосредственное участие в проектировании которого приняли авторы данной статьи. Вертикальными элементами несущего каркаса здания служат трубобетонные колонны высокой заводской готовности. Стальные оболочки колонн поставляются с завода на строительную площадку готовыми к монтажу (рис. 3).

Выполненный хронометраж времени монтажа ТБК высотой на три этажа показал, что крепление на болтах стальной трубы к фундаменту занимает 8 мин. Заполнение трубы бетонной смесью производится на строительной площадке. Самоуплотняющаяся смесь подается под давлением бетононасосом через отверстие в нижней части трубы методом восходящего раствора. В результате процесс заполнения трубы бетоном длится всего 12 мин. При этом не требуется опалубка и гарантируется необходимое качество бетонирования.



Рис. 3. Поставка готовых к монтажу стальных труб-оболочек
Fig. 3. Delivery of ready-to-install steel casing tubes

Учитывая тот факт, что труба может воспринимать нагрузку от нескольких вышележащих перекрытий, время набора бетоном колонны проектной прочности не влияет на скорость возведения каркаса. Перечисленные обстоятельства позволяют обеспечивать высокую скорость при требуемом качестве монтажа ТБК, что безусловно влияет на снижение приведенных затрат на строительство.

Материалы и методы исследования

Определяя рациональную область применения ТБК с учетом отмеченных достоинств, важно понимать, что в зависимости от используемых материалов и конструктивного решения их прочность может меняться в довольно широких пределах. Покажем, насколько можно повысить прочность (или снизить размеры поперечного сечения) колонн при грамотном их конструировании.

Для наглядности остановимся на простом примере. Рассмотрим железобетонную колонну и два варианта короткой трубобетонной колонны круглого сечения. Прочность бетона принята одинаковой. Бетон тяжелый класса В70 на базальтовом щебне. Железобетонная колонна изготавливается по традиционной технологии при вертикальном бетонировании сверху. Трубобетонные колонны бетонируются методом восходящего раствора. Для железобетонной колонны принята продольная арматура Ø40 А500С. Поперечная арматура Ø10 А240. Сталежелезобетонная колонна в первом варианте изготавливается из трубы с классом стали С345. Бетон не армируется. Во втором используется труба из стали С590. Для повышения прочности ядра в бетоне размещается продольная арматура 10Ø40 А600С. Вокруг продольной арматуры с шагом 75 мм навита спираль из арматуры Ø10 А500С.

Осевая сжимающая нагрузка на все колонны одинакова – $N = 7500$ т. С целью упрощения расчеты выполняются для коротких центрально сжатых элементов.

Прочность железобетонной колонны определяется по формуле

$$N_u = \gamma_{b3} R_b A + R_{sc} A_{s, tot}, \quad (1)$$

где R_b и R_{sc} – расчетное сопротивление бетона и продольной арматуры сжатию; A и A_p – площади поперечных сечений бетона и арматуры; $\gamma_{b3} = 0,85$ – коэффициент условий работы при высоте слоя бетонирования более 1,5 м.

Прочность центрально сжатой ТБК определяется по формуле

$$N = R_{b3} A + \sigma_{pz} A_p + \sigma_{sz} A_s, \quad (2)$$

где R_{b3} – расчетное сопротивление бетонного ядра объемному сжатию; σ_{pz} – сжимающее напряжение осевого направления в стальной трубе; σ_{sz} – сжимающее напряжение в продольной арматуре; A , A_p и A_s – площади поперечных сечений бетонного ядра, стальной трубы и продольной арматуры.

Методика определения прочности ТБК по фактическим прочностным характеристикам бетона и стали дана в [11]. Ниже приведены формулы для расчетов по первой группе предельных состояний. Для ТБК без армирования бетонного ядра используются формулы (3)-(6).

Конструктивный коэффициент трубобетона

$$\rho = 0,85 \frac{R_{pn} A_p}{R_{bn} A}, \quad (3)$$

где R_{pn} – нормативное сопротивление растяжению стальной трубы; R_{bn} – нормативное сопротивление бетона сжатию.

Относительная величина бокового давления со стороны стальной оболочки на бетонное ядро в предельном состоянии ($\bar{\sigma} = \sigma_{br} / R_b$)

$$\bar{\sigma} = 0,36e^{-(a+b)} \rho^{0,8}, \quad (4)$$

где a и b – коэффициенты материала (для ТБК из тяжелого бетона $a = 0,125$ и $b = 0,25$).

Нормативное сопротивление бетона объемному сжатию от реактивного давления трубы вычисляется по формуле

$$R_{bno} = R_{bn} \left[1 + 0,8 \cdot \left(0,5 \bar{\sigma} + \frac{\bar{\sigma} - 2}{4} + \sqrt{\left(\frac{\bar{\sigma} - 2}{4} \right)^2 + \frac{\bar{\sigma}}{b}} \right) \right]. \quad (5)$$

Сжимающее напряжение в трубе

$$\sigma_{pz} = R_b \left(\sqrt{\rho^2 - 3\bar{\sigma}^2} - \bar{\sigma} \right) \frac{A}{A_p}, \quad (6)$$

где R_b – расчетное сопротивление бетона сжатию.

Наличие продольной и спиральной арматуры учитывается с использованием формул, приведенных в [12]. Влияние дополнительной косвенной арматуры во многом зависит от коэффициента спирального армирования

$$\mu_{s,c} = \frac{2A_{s,c}}{d_c s}, \quad (7)$$

в которой $A_{s,c}$ – площадь сечения арматуры спирали, $d_{s,c}$ и s – диаметр и шаг спирали.

Боковое давление со стороны спиральной арматуры на бетонное ядро

$$\sigma_{bc} = 0,95 \cdot \mu_{s,c} R_{s,c}, \quad (8)$$

где $R_{s,c}$ – расчетное сопротивление растяжению арматуры спирали.

Относительная величина бокового давления на бетон в пределах спирали

$$\bar{\sigma}_s = \bar{\sigma} + \sigma_{bc} / R_{bn}. \quad (9)$$

Нормативное сопротивление бетона объемному сжатию в пределах спирального армирования R_{bnc} вычисляется по формуле (5) с заменой $\bar{\sigma}$ на $\bar{\sigma}_s$. Осредненное нормативное сопротивление сжатию бетонного ядра

$$R_{bn3} = \frac{R_{bn0} (A - A_c) + R_{bnc} A_c}{A}, \quad (10)$$

где A_c – площадь поперечного сечения бетона внутри спирали.

Переход к расчетному сопротивлению осуществляется согласно требованиям СП 63.13330.2018.

В соответствии с указаниями действующих норм проектирования железобетонных конструкций расчетное сопротивление арматуры сжатию должно приниматься не более 400 МПа независимо от ее класса. Это ограничение вытекает из условия совместной работы арматуры с бетоном. Однако предельные осевые деформации ТБК значительно превышают деформации одноосно сжатого бетона. Данный факт позволяет эффективно использовать в ядре высокопрочную арматуру при ее работе на сжатие. Максимальное напряжение в этой арматуре σ_{sz} рассчитывается по формуле

$$\sigma_{sz} = \left(0,1 \frac{\varepsilon_{sz} - \varepsilon_{s1}}{\varepsilon_{so} - \varepsilon_{s1}} + 0,9 \right) R_s \leq R_s, \quad (11)$$

в которой ε_{sz} – осевая деформация трубы в предельном состоянии по прочности, а деформации ε_{s0} и ε_{s1} определяются по следующим формулам:

$$\varepsilon_{s0} = \frac{R_s}{E_s} + 0,002; \quad (12)$$

$$\varepsilon_{s1} = \frac{0,9R_s}{E_s}, \quad (13)$$

где E_s – модуль упругости арматуры.

Из условия совместной работы трубы и бетонно-го ядра, в основном обеспечиваемой значительными силами трения между ними, деформация ε_{sz} принимается равной деформации объемно-сжатого бетона при максимальном напряжении, то есть $\varepsilon_{sz} = \varepsilon_{b00}$. Эта деформация определяется по формуле

$$\varepsilon_{b00} = \varepsilon_{b0} \alpha_b^{3,2} - \frac{R_b}{E_b} (\alpha_b^{3,2} - \alpha_b), \quad (14)$$

в которой ε_{b0} – деформация в вершине диаграммы состояния одноосно-сжатого бетона; E_b – начальный модуль упругости бетона; $\alpha_b = R_{b3}/R_b$.

Деформацию ε_{b0} и модуль упругости бетона E_b (в МПа) для тяжелого бетона рекомендуется определять в зависимости от его класса по прочности на сжатие B ($15 \leq B \leq 100$) по следующим формулам:

$$\varepsilon_{b0} = \frac{1,2 + 0,16\sqrt{B}}{1000}; \quad (21)$$

$$E_b = (55250 - \frac{122000}{\sqrt{B}}) \cdot \beta, \quad (22)$$

где β – коэффициент, учитывающий вид крупного заполнителя бетона (для гранита $\beta = 1$; для базальта $\beta = 1,2$; для известняка $\beta = 0,9$).

Основные результаты расчета для всех трех колонн представлены в табл. 1.

Приведенные в табл. 1 данные показывают, что трубобетонные колонны при примерно одинаковой прочности имеют заметно меньшие размеры поперечного сечения. Немного больший расход стали в трубобетонной колонне I обусловлен двумя факторами. Во-первых, в таблице не учтен расход поперечной арматуры. Во-вторых, для арматуры железобетонной колонны принята более прочная сталь. Например, если использовать трубы 1320×12 из стали С440, то расход металла можно сократить на 16% при прочности колонны 7770 т.

Таблица 1. Результаты расчета железобетонной и трубобетонной колонн
Table 1. Results of calculation of reinforced concrete and concrete filled steel tube columns

| Вид колонны | Диаметр поперечного сечения / сечение трубы, мм | Площадь сечения арматуры, см ² | Площадь сечения трубы, см ² | Расход бетона на 1 п.м длины, м ³ | Расчетная прочность, т |
|------------------|---|---|--|--|------------------------|
| Железобетонная | 1500 | 528 | – | 1,72 | 7507 |
| Трубобетонная I | 1320×14 | – | 574 | 1,31 | 7566 |
| Трубобетонная II | 1120×12 | 126 | 418 | 0,93 | 7527 |

Примечание. Расход поперечной и спиральной арматуры в таблице не учтен.

Применение трубы из стали класса С590 и высокопрочной продольной арматуры в ядре привело к существенному увеличению прочности колонны. При заданной нагрузке это позволило в 1,34 раза сократить размеры поперечного сечения. Следует также заметить, что армирование бетонного ядра приводит к повышению огнестойкости ТБК. Как показывают наши расчеты, за счет рационально назначенного расстояния от внутренней поверхности трубы до продольной арматуры и количества этой арматуры можно обеспечивать огнестойкость R150 без какой-либо внешней защиты трубы. Для обеспечения огнестойкости R240 дополнительно следует оштукатурить трубу цементно-песчаным раствором с толщиной слоя 30–35 мм. Запланирована серия огневых испытаний ТБК для подтверждения фактической огнестойкости R240 без использования огнезащитных составов и конструктивной огнезащиты колонны.

Приведенные результаты свидетельствуют о высокой эффективности применения высокопрочных труб и арматуры в ТБК. Расчеты показывают, что в этих конструкциях можно было полностью использовать прочностные свойства сжатой арматуры класса А800, получив заметное снижение расхода стали. Но, к сожалению, в настоящее время наши металлургические заводы выпускают такую арматуру только небольших диаметров.

Полученные результаты и их обсуждение

Результаты выполненного анализа различных вариантов конструкции колонн несущих каркасов высотных зданий использованы при проектировании многофункционального комплекса «Деловой центр УГМК», который начали возводить летом 2024 года в центре делового квартала «Екатеринбург-Сити». На рис. 4 приведена фотография строительной площадки этого здания по состоянию на август 2024 года. Основные размеры проектируемого здания в осях составляет 81,0×74,0 м. Высота здания – 99,9 м. Коли-

чество этажей – 26. Общая площадь здания составляет 72282,7 м², строительный объем – 313109 м³.

Конструктивная система здания каркасно-стволовая. ТБК располагались вокруг ядра жесткости с шагом 9×9 и 9×10 м. Их объединяли между собой монолитные безбалочные перекрытия. В связи с большими пролетами перекрытия выполнялись многопустотными, толщиной 300 мм.



Рис. 4. Возведение 20-го этажа высотного здания

Fig. 4. Construction of the 20th floor of a high-rise building

Колонны проектировались с применением высокопрочного бетона, из труб с классом стали С440 и высокопрочной продольной арматуры класса А600С. Арматурный каркас имел и косвенную арматуру в виде спирали Ø8 А500С. Принятое конструктивное решение ТБК сделало невозможным осуществление расчета их несущей способности по методикам, приведенным в действующем нормативном документе СП 266.1325800.2016. В этой связи на основании методики [11] был разработан и реализован в компьютерной программе алгоритм деформационного расчета, учитывающий наличие в колоннах спиральной арматуры.

Первоначально принимаемые проектные размеры сечения железобетонных колонн нижнего яруса составляли 1400×1400 мм. В окончательном варианте диаметр наиболее нагруженной ТБК составил 720 мм.

Следует отметить, что это первый опыт применения ТБК в высотном здании в России. Основные данные по расходу материалов в трубобетонных колоннах несущего каркаса представлены в табл. 2. В табл. 3 приведены основные параметры материалоемкости проекта с двумя вариантами исполнения каркаса – железобетонном и сталежелезобетонном.

Исключение из себестоимости конструкций колонн стоимости вытесненных материалов, их доставки, укладки, исключения опалубочных работ, армирования, прогрева бетона при отрицательных температурах, количества рабочей силы и т.д. дают существенное сокращение себестоимости строительства в целом, а также повышают эффективность ключевых процессов строительства в совокупности с переходом на индустриальное строительство за счет использования передовых изделий заводской готовности.

Таблица 2. Результаты расчета трубобетонных колонн

Table 2. Results of calculation of concrete filled steel tube columns

| Расположение ТБК | Арматура, кг | Бетон, м ³ | Расход арматуры, кг/м ³ | Труба, кг |
|----------------------|--------------|-----------------------|------------------------------------|-----------|
| ТБК ниже отм. 0,000 | 182 200 | 289,92 | 628 | 224 700 |
| ТБК выше отм. 0,000 | 148 700 | 304,11 | 489 | 230 600 |
| ТБК выше отм. 35.400 | 126 600 | 376,15 | 337 | 309 500 |

Таблица 3. Сравнение основных показателей материалоемкости колонн здания для отметки выше 0.000

Table 3. Comparison of the key indicators of the material content of building columns for the mark above 0.000

| Наименование показателя | Железобетонные колонны | ТБК |
|--|------------------------|-------|
| Объем бетона колонн на 1 м ² площади помещений | 0,089 | 0,014 |
| Масса арматуры колонн на 1 м ² площади помещений, кг | 13,33 | 10 |
| Масса стальной трубы на 1 м ² площади помещений, кг | – | 11,27 |
| Количество сборных изделий и монтажных элементов на объекте шт./м ² | – | 0,010 |

Анализ сталежелезобетонного конструктивного решения Делового центра «УГМК» с применением трубобетонных колонн и многопустотных монолитных перекрытий в сравнении с традиционным монолитным каркасом здания показал следующее:

- Расход конструкционной стали на 1 м² на площади помещений здания составил 5 кг.
- Расход конструкционной стали на 1 м³ на строительный объем здания составил 2,44 кг.

– Расход всего металла в ТБК (труба и арматура) на 1 м² на площади помещений здания составил 18 кг.

– Расход арматуры на 1 м³ строительного объема здания в железобетонном варианте составляет 12 кг, а в сталежелезобетонном в 3 раза меньше.

Таким образом, применение в каркасе высотного здания ТБК в сочетании с многопустотным монолитным перекрытием привело к существенному улучшению основных технико-экономических показателей проекта. Полученный опыт анализируется и обобщается. Планируется использовать его при проектировании других подобных объектов.

Заключение

Приведенные материалы наглядно демонстрируют высокую эффективность применения трубобетона из высокопрочных материалов в качестве сильно нагруженных колонн. Полученные в процессе проектирования высотного здания параметры материалоемкости несущего каркаса свидетельствуют о заметном снижении расхода основных материалов в случае применения ТБК взамен железобетонных. Положительный опыт практического использования ТБК в высотном строительстве рекомендуется к широкому распространению.

Список источников

1. Bhure N., Tiwari N. Steel Concrete Composite Construction - A Review // IJRASET. 2018, no. 6, pp. 564–566.
2. Han L.H., Li W., Bjorhovde R. Developments and advanced applications of concrete filled steel tubular (CFST) structures // Journal of Constructional Steel Research. 2014, no. 100, pp. 211–228.
3. Axial compressive performance of UHPC filled steel tube stub columns containing steel-polypropylene hybrid fiber / Xu L. H., Lu Q. R., Chi Y., et al. // Construction and Building Materials. 2019, no. 204, pp. 754–767.
4. Белый Г.И., Ведерникова А.А. Исследование прочности и устойчивости трубобетонных элементов конструкций обратным численно-аналитическим методом // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 2 (85). С. 26–35.
5. Хазов П.А., Помазов А.П. Экспериментальное исследование продольного и поперечного изгиба трубобетонных стержней // Жилищное строительство. 2023. № 12. С. 66–71.
6. Hossain K.M.A., Chu K. and Anwar M.S. Axial load behavior of ultrahigh strength concrete-filled steel tube columns of various geometric and reinforcement configurations // Infrastructures. 2021, no. 6, 6050066.
7. Behaviour and design of ultra- high- strength CFST members subjected to compression and bending / Huang Z., Li D., Uy B., Wang J. // Journal of Constructional Steel Research. 2020, 106351.
8. Le TT, Asteris P.G and Lemonis M.E. Prediction of axial load capacity of rectangular concrete-filled steel tube columns using machine learning techniques // Engineering with Computers. 2021, pp.1–34.
9. Influence of loading method and stiffening on the behavior of short and long CFST columns / Shaker F.M.F., Ghanem G.M., Deifalla A.F., Hussein I.S. and Fawzy M.M. // Steel Compos. Struct. 2022, no. 44, pp. 281–293.
10. Compressive Strength of Steel Fiber-Reinforced Concrete Employing Supervised Machine Learning Techniques / Zhang Q., Kamiński P., Deifalla A.F., et al. // Materials. 2022, no.15, 4209.
11. Кришан А. Л., Римшин В. И., Астафьева М.А. Сжатые трубобетонные элементы. Теория и практика. М.: АСВ, 2020. 375 с.
12. Krishan A.L., Astafeva M.A., Chernyshova E.P. Numerical and Experimental Investigation of Axially Loaded Columns with Spiral Reinforcement // Materials Science Forum. 2023, no.1087, pp. 163–168.

References

1. Bhure N., Tiwari N. Steel Concrete Composite Construction - A Review. IJRASET. 2018;(6): 564-566.
2. Han L.H., Li W., Bjorhovde R. Developments and advanced applications of concrete filled steel tubular (CFST) structures. Journal of Constructional Steel Research. 2014;(100):211-228.
3. Xu L.H., Lu Q.R., Chi Y., et al. Axial compressive performance of UHPC filled steel tube stub columns containing steel-polypropylene hybrid fiber. Construction and Building Materials. 2019;(204):754-767.
4. Belyy G.I., Vedemikova A.A. The inverse numerical-analytical method for studying the strength and stability of concrete-filled steel tube structural members. Vestnik grazhdanskix inzhenerov [Bulletin of Civil Engineers]. 2021; (2(85)):26-35. (In Russ.)
5. Khazov P.A., Pomazov A.P. Experimental study of longitudinal and transverse bending of pipe concrete rods. Zhilishchnoe Stroitelstvo [Housing Construction]. 2023;(12):66-71. (In Russ.)
6. Hossain K.M.A., Chu K. and Anwar M.S. Axial load behavior of ultrahigh strength concrete-filled steel tube columns of various geometric and reinforcement configurations. Infrastructures. 2021;(6): 6050066.
7. Huang Z., Li D., Uy B., Wang J. Behaviour and design of ultra- high- strength CFST members subjected to compression and bending. Journal of Constructional Steel Research. 2020;106351.
8. Le TT, Asteris P.G and Lemonis M.E. Prediction of axial load capacity of rectangular concrete-filled steel tube columns using machine learning techniques. Engineering with Computers. 2021;1-34.
9. Shaker F.M.F., Ghanem G.M., Deifalla A.F., Hussein I.S. and Fawzy, M.M. Influence of loading method and stiffening on the behavior of short and long CFST columns. Steel Compos. Struct. 2022;(44):281-293.
10. Zhang Q., Kamiński P., Deifalla A.F., et al. Compressive Strength of Steel Fiber-Reinforced Concrete Employing Supervised Machine Learning Techniques. Materials. 2022;(15):4209.
11. Krishan A.L., Rimshin V.I., Astafieva M.A. Szhatyie trubobetonnye elementy. Teoriya i praktika [Compressed concrete filled steel elements. Theory and practice]. Moscow: ASV. 2020. 375 p. (In Russ.)
12. Krishan A.L., Astafeva M.A., Chernyshova E.P. Numerical and Experimental Investigation of Axially Loaded Columns with Spiral Reinforcement. Materials Science Forum. 2023;(1087):163-168.

Поступила 19.06.2025; принята к публикации 05.12.2025; опубликована 31.03.2026
Submitted 19/06/2025; revised 05/12/2025; published 31/03/2026

Кришан Анатолий Леонидович – доктор технических наук, профессор, советник РААСН,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: kris_al@mail.ru. ORCID 0000-0002-5851-152X

Астафьева Мария Анатольевна – кандидат технических наук,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: skymanika@mail.ru. ORCID 0000-0003-1354-0324

Парфенов Вячеслав Викторович – директор,
ООО «Структура Эксперт», Екатеринбург, Россия.
Email: vvp@structura-expert.com.

Вавилин Никита Вячеславович – главный конструктор,
ООО «Структура Эксперт», Екатеринбург, Россия.
Email: vavilin@structura-expert.com.

Anatoly L. Krishan – DrSc (Eng.), Professor, Counsellor of the RAACS,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: kris_al@mail.ru. ORCID 0000-0002-5851-152X

Mariia A. Astafieva – PhD (Eng.),
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: skymanika@mail.ru. ORCID 0000-0003-1354-0324

Viacheslav V. Parfenov – Director,
LLC Structura Expert, Yekaterinburg, Russia.
Email: vvp@structura-expert.com.

Nikita V. Vavilin – Chief Designer,
LLC Structura Expert, Yekaterinburg, Russia.
Email: vavilin@structura-expert.com.

ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И РЫНОК ПРОДУКЦИИ

ECONOMICS, MANAGEMENT AND PRODUCT MARKET

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 332.1+330.4
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-1-176-191



ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ВАРИАЦИЯ ЦЕН В РЕГИОНАЛЬНОМ КОНТЕКСТЕ: СИСТЕМАТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЗАРУБЕЖНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Красносельская Д.Х., Тимирьянова В.М., Прудников В.Б., Гайнцева Е.С.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

Аннотация. Пространственная вариация цен зависит от влияния различных факторов. В существующей литературе эмпирические исследования по этой теме значительно различаются в зависимости от вида товаров, целей исследований и их методологии, рассматриваемому уровню пространственной иерархии. В данной работе проведен анализ исследований, посвященных пространственной вариации цен наиболее распространенных товаров, их основным детерминантам, применяемым методам анализа, а также наличию или отсутствию пространственного компонента в изменении цен. Используя систематический подход и метод PRISMA, мы рассмотрели 278 статей и провели контент-анализ на основе базы данных Scopus и ресурса журналов Tandfonline. Результаты показали, что в современной литературе преобладают исследования, связанные с вариацией цен на жилье и землю. Наиболее значимыми факторами, влияющими на разницу в ценах на жилье, являются архитектурные характеристики, местоположение (географические переменные), социально-экономические факторы, наличие локальных удобств или недостатков, а также особенности сделок по покупке жилья. Детерминанты вариации цен на землю тесно связаны с типом участка: цены на жилую землю зависят от доступности инфраструктуры и удаленности от различных социальных объектов (образование, здравоохранение). Наиболее распространенной пространственной единицей анализа в исследованиях цен на землю является страна, тогда как в работах по ценам на жилье доминирует городской масштаб. Вклад данного исследования в научную литературу заключается в следующем. Во-первых, мы анализируем статьи из нашей выборки с точки зрения различных типов цен и методов, используемых для оценки влияния факторов на пространственную вариацию цен на разных уровнях пространства. Полученные результаты могут служить основой для исследователей, изучающих пространственную динамику цен. Во-вторых, мы выявили, что цены на продовольственные товары представляют собой наиболее перспективное направление для изучения сезонных и временных аспектов пространственной вариации цен.

Ключевые слова: пространственная вариация цен, пространственная волатильность, цены на жилье, цены на землю

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РНФ № 24-28-00774, <https://rscf.ru/project/24-28-00774/>

© Красносельская Д.Х., Тимирьянова В.М., Прудников В.Б., Гайнцева Е.С., 2026

Для цитирования

Пространственная вариация цен в региональном контексте: систематический обзор зарубежной литературы / Красносельская Д.Х., Тимирьянова В.М., Прудников В.Б., Гайнцева Е.С. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №1. С. 176-191. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-176-191>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

SPATIAL PRICES VARIATION IN THE REGIONAL CONTEXT: A SYSTEMATIC REVIEW OF FOREIGN LITERATURE

Krasnoselskaya D.Kh., Timiryanova V.M., Prudnikov V.B., Gaintseva E.S.

Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

Abstract. The spatial variation in prices depends on the influence of various factors. In the existing literature, empirical studies on this topic differ significantly depending on the type of goods, the objectives of the research and its methodology, and the level of spatial hierarchy under consideration. In this paper, we analyze the studies devoted to the spatial variation of prices of the most common goods, their main determinants, the analytical methods used, and the presence or absence of a spatial component in price changes. Using a systematic approach and the PRISMA method, we have reviewed 278 articles and conducted a content analysis based on the Scopus database and the Tandfonline journal resource. The results have shown that the contemporary literature is dominated by studies related to variations in housing and land prices. The most significant factors influencing the difference in housing prices include architectural characteristics, location (geographical variables), social and economic factors, the presence of local amenities or disamenities, as well as the specifics of housing purchase transactions. The determinants of land price variation are closely related to the type of land plot: residential land prices depend on the accessibility of infrastructure and distance from various social facilities (such as education and healthcare). The most common spatial unit of analysis in land price studies is the country, while the urban scale analyses dominate in research on housing prices. The contribution of this study to the scientific literature is as follows. Firstly, the selected articles in terms of the different types of prices and the methods used to assess the influence of factors on the spatial variation of prices at different levels of space are analyzed. The results obtained may serve as a basis for researchers studying the spatial dynamics of prices. Secondly, it has been found that food prices represent the most promising area for studying seasonal and temporal aspects of spatial price variation.

Keywords: spatial price variation; spatial volatility; housing prices, land prices

The study was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation grant No. 24-28-00774, <https://rscf.ru/project/24-28-00774/>

For citation

Krasnoselskaya D.Kh., Timiryanova V.M., Prudnikov V.B., Gaintseva E.S. Spatial Prices Variation in the Regional Context: a Systematic Review of Foreign Literature. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 1, pp. 176-191. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-176-191>

Введение

Цена как ключевой элемент рыночной системы играет определяющую роль в распределении товаров и услуг. Ее вариация отражает изменения различных факторов в конкретных регионах. Основные сложности в исследовании пространственных различий цен между территориями обусловлены неоднородностью их социально-экономической среды, влияющей на рыночные механизмы. Существующий научный задел по данной теме остается фрагментированным, наше исследование нацелено на анализ основных типов пространственных цен (на жилье, землю и продовольствие), определение детерминант их вариации и изучение применяемых методов анализа.

Для обеспечения качества исследований, включенных в обзор, мы сосредоточились на статьях, индексированных в базах данных Scopus и размещенных на сайте журналов Tandfonline. Поиск проводился с использованием строгих критериев включения, что позволило избежать систематической ошибки отбора и четко определить границы исследования.

Существующие работы подчеркивают различные аспекты пространственной вариации. Территориальные различия цен и их конвергенция рассматривают-

ся в исследованиях Girardin & Sall [1] (Африка), Wu et al [2] (Китай), Cunha & Loureiro [3] (Португалия), Gray [4] (Англия и Уэльс), Kirikos [5] (Греция).

В российской научной практике также изучается пространственная вариация цен:

– различия цен на овощи и фрукты (Тимирьянова, Лакман, Красносельская, Столь [6]; Тимирьянова, Лакман, Прудников, Красносельская [7]);

– конвергенция региональных цен (Глущенко [8]; Ступникова [9]; Синельников-Мурылев, Перевышин, Трунин [10]);

– пространственный анализ индексов потребительских цен на продовольствие (Кириллов [11]; Иванова [12]).

В целом обзор литературы служит важным инструментом обобщения эмпирических исследований. С одной стороны, они могут носить описательный характер, отражая мнение авторов по конкретной тематике без строгой методологической основы. Например, Santeramo и соавторы [13] представили критический обзор факторов волатильности цен на зерно, выделив эндогенные и экзогенные факторы ценовой динамики. Авторы установили, что запасы, торговля и динамика спроса-предложения являются ключевыми детерминантами вариации цен на зерно.

Гилберт и Морган [14] проанализировали волатильность цен на продовольствие, рассмотрев два временных периода: 1970-1989 и 1990-2009 годы. Авторы выделили следующие товарные группы: напитки и сахар, зерновые, жиры и масла, мясо и рыба, свежие фрукты. В числе основных причин ценовой волатильности были выявлены: шоки производства и потребления, объемы запасов, рыночные спекуляции (включая влияние институциональных инвесторов) и климатические изменения.

В противовес этому систематический подход предполагает строгую методологию сбора, анализа и интерпретации данных. Ли и соавторы [15] представили систематический обзор факторов, влияющих на цены на жилье в Китае (крупные города - Пекин, Шанхай, Гуанчжоу, Шэньчжэнь и города второго эшелона). Относительно высокие цены в восточных регионах авторы объяснили через влияние четырех мета-категорий факторов:

- 1) экономические (ВВП, уровень безработицы, располагаемый доход, цена земли, денежная масса);
- 2) социальные (демографические показатели, структура семьи, культурные особенности);
- 3) административные (государственное регулирование, налоги на недвижимость, политика покупки жилья);
- 4) экологические (этажность, возраст зданий, экологические риски, рельеф местности).

Изначально методология систематических обзоров зародилась в медицинских исследованиях. В настоящее время она получила распространение в психологии (Zheng et al. [16]), биологии (Ten, Raga и Aznar [17]), экономике (Meerow, Newell и Stults [18]) и других научных дисциплинах.

Строгая методология систематических обзоров, заимствованная из медицины, позволяет минимизировать систематические ошибки и неопределенности, обеспечивая обоснованность выводов. Она включает:

- выбор источников данных;
- стратегию поиска (набор ключевых слов);
- временные рамки;
- языковые критерии;
- процедуру независимой оценки релевантности публикаций.

Именно эти элементы отличают систематические обзоры от традиционных описательных (нарративных), которые основываются на субъективном мнении исследователя и не обеспечивают воспроизводимости результатов – ключевого критерия научного знания.

Настоящее исследование не претендует на всеобъемлющий анализ пространственной вариации цен всех товаров и услуг на региональных рынках. Вопросы применения статистических методов для выявления «горячих точек» и тенденций пространственного распределения цен не являются предметом нашего исследования. Для изучения этих аспектов мы рекомендуем читателям ознакомиться с публикациями Neuman, Law и Berghauser [19] (методы гедонистического ценообразования) и Rapsomnikis, Hallam и Conforti [20] (эконометрика временных рядов для мо-

делирования ценовой волатильности). Наш фокус исследования сужен до ключевых компонентов исследований пространственной вариации цен в контексте региональной экономики. Систематический обзор проводился в соответствии с методологией PRISMA с использованием прозрачных критериев включения публикаций.

Цели исследования:

1. Выявить преобладающие типы пространственных цен в англоязычных исследованиях и степень их изученности.
2. Определить ключевые методологические подходы к моделированию различных типов пространственных цен.
3. Проанализировать пространственные масштабы в эмпирических исследованиях.

Настоящий систематический обзор состоит из следующих разделов:

- раздел 2 (Материалы и методы исследования): описание методологии исследования;
- раздел 3 (Результаты): основные выводы анализа;
- раздел 4 (Обсуждение): интерпретация полученных результатов;
- раздел 5 (Заключение): итоговые выводы и рекомендации.

Материалы и методы исследования

При проведении данного систематического обзора мы следовали методологии PRISMA* (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), адаптированной к нашей области исследования. Наше исследование не включает предварительно зарегистрированный протокол анализа данных. Следование принципам PRISMA позволило нам провести прозрачный поиск литературы и детально описать процесс исследования, использованные методы и критерии отбора.

Наш набор данных включал две базы поиска: Scopus и сайт журналов Tandfonline.

Поиск публикаций проводился в январе 2024 года. В связи с ограничениями доступа к Scopus Preview Search в России извлечение DOI статей выполнялось с использованием R-кода (пакет rscopus). На следующем этапе, используя Digital Object Identifier (DOI), мы находили полные тексты статей через Google Scholar или путем запроса авторам на ResearchGate.net. Сайт журналов Tandfonline предоставляет открытый доступ и позволяет проводить поиск по заранее определенным критериям.

Подробная информация о формировании набора данных и стратегии поиска представлена в **табл. 1**.

Первоначально было собрано 127 публикаций из базы данных Scopus и 151 статья с сайта журналов Tandfonline. Процесс отбора исследований представлен на **рис. 1**, который иллюстрирует поэтапную схему проведения систематического обзора.

* Рекомендации по отчетности PRISMA. <https://www.prisma-statement.org/>

Таблица 1. Детали формирования выборки и стратегия поиска в исследовании
Table 1. Details of selection and search strategy of the study

| | Базы поиска | |
|--|---|---|
| | Scopus | Сайт журнала Tandfonline (https://www.tandfonline.com/) |
| Поисковые запросы | (spatial OR space OR geographical) AND (varia* OR dispersion) AND price | |
| Разделы публикаций, в которых обнаружены поисковые термины | Аннотация и ключевые слова | |
| Тип публикации | Научная статья | |
| Временные периоды | 01/01/2013-31/12/2023 | |
| Критерии включения/исключения | | |
| Публикации в открытом доступе | + | + |
| Область исследования | Региональная/ пространственная экономика, география | География |
| Язык публикации | Английский язык | Английский язык |
| Тип публикации | Это не материалы конференции; статья представляет собой эмпирическое исследование | |

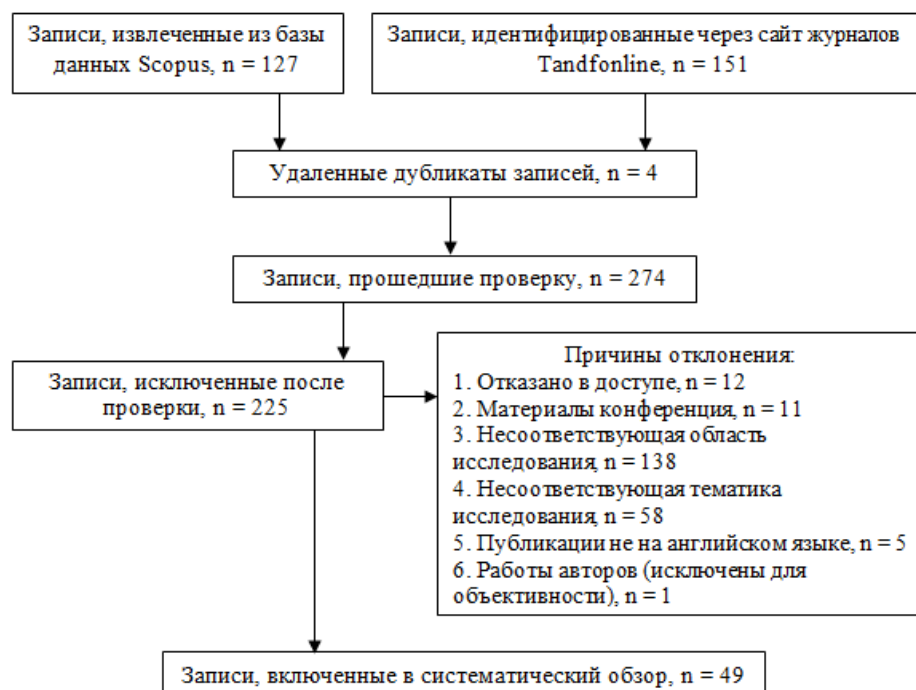


Рис. 1. Блок-схема проведения систематического обзора
Fig. 1. Systematic review flowchart

Два независимых эксперта провели отбор статей, проверяя соответствие их названий и аннотаций целям и критериям нашего исследования. После исключения нерелевантных публикаций мы получили 49 работ.

На следующем этапе детально изучили эти 49 статей, занеся в таблицы MS Excel следующие данные: название, аннотацию, ключевые слова, имена авторов и их аффилиации, название журнала, год публикации, страну исследования, уровень пространственного анализа (страна, город и т.д.), исследовательский вопрос (цель работы), типы пространственных цен, методы исследования, полученные результаты.

После первичного анализа углубили исследование, выделив факторы, влияющие на пространствен-

ную вариацию цен. Разногласия между экспертами разрешались путем достижения консенсуса.

Результаты

Для анализа географического распределения современных исследований и их цитирований мы извлекли метаданные статей и, используя программное обеспечение VosViewer, обобщили эти данные (табл. 2). Китай, США и Великобритания лидируют по количеству статей и долям цитирований.

Сформированные кластеры данных демонстрируют различные аспекты пространственного распределения цен в исследуемой выборке (рис. 2).

Таблица 2. Географическое распределение исследований в выборке и их цитирование
Table 2. Geographical distribution of studies in the sample and their citation

| Страна | Характеристики | | | |
|-----------------|-------------------|------------------------|----------------|---------------------|
| | Количество статей | Количество цитирований | Доля статей, % | Доля цитирований, % |
| Китай | 15 | 690 | 23,08 | 37,14 |
| США | 15 | 358 | 23,08 | 19,27 |
| Великобритания | 6 | 94 | 9,23 | 5,06 |
| Бельгия | 2 | 77 | 3,08 | 4,14 |
| Иран | 1 | 28 | 1,54 | 1,51 |
| Канада | 2 | 8 | 3,08 | 0,43 |
| Гонконг (Китай) | 3 | 186 | 4,62 | 10,01 |
| Франция | 2 | 33 | 3,08 | 1,78 |
| Греция | 2 | 138 | 3,08 | 7,43 |
| Испания | 2 | 54 | 3,08 | 2,91 |
| Австралия | 4 | 42 | 6,15 | 2,26 |
| Дания | 1 | 7 | 1,54 | 0,38 |
| Финляндия | 1 | 16 | 1,54 | 0,86 |
| Германия | 3 | 38 | 4,62 | 2,05 |
| Гана | 1 | 13 | 1,54 | 0,70 |
| Индия | 2 | 8 | 3,08 | 0,43 |
| Новая Зеландия | 1 | 61 | 1,54 | 3,28 |
| Южная Корея | 2 | 7 | 3,08 | 0,38 |

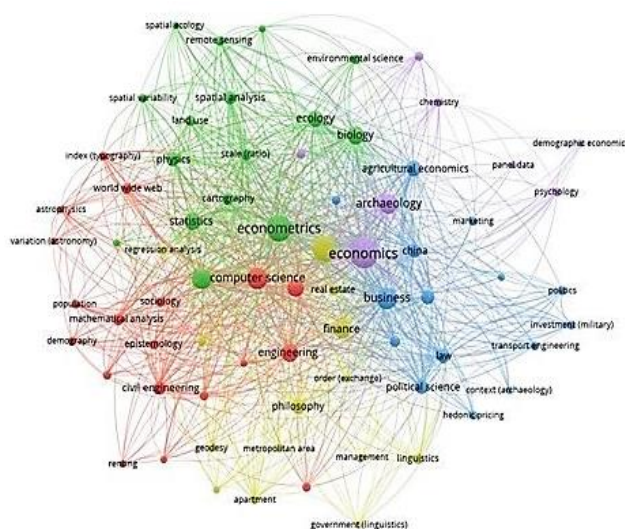


Рис. 2. Кластеризация объектов исследования
Fig. 2. Clustering of research objects

Результаты кластерного анализа показывают, что понятие пространственной вариативности демонстрирует междисциплинарные характеристики. Она тесно связана с такими терминами, как «пространственный анализ», «дистанционное зондирование», «эконометрика», «статистика», «компьютерные науки», «картография» (см. рис. 2). Таким образом, на данном предварительном этапе анализа делаем вывод, что вопросы пространственной вариативности относятся скорее к области математического анализа и эконометрики, чем к чистой экономической теории (рис. 3).

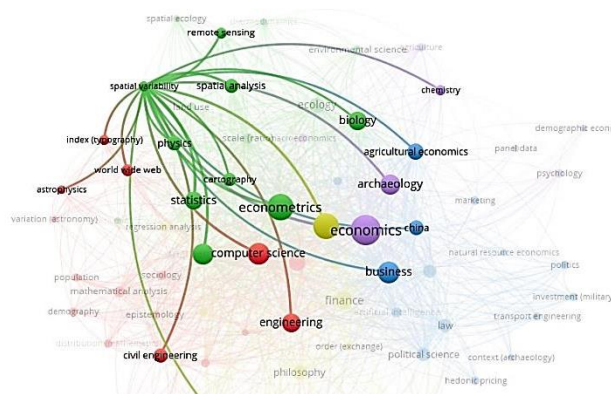


Рис. 3. Связи термина «пространственная вариативность»
Fig. 3. «Spatial variability» term connections

Согласно распределению публикаций и цитирований по годам (рис. 4), наблюдаем пик этих показателей в 2018 году, после чего количество публикаций и цитирований начинает снижаться.

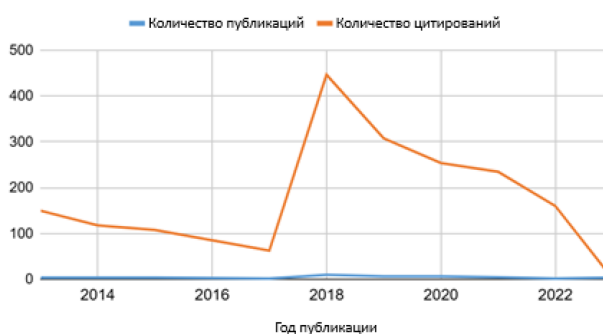


Рис. 4. Динамика количества публикаций и цитирований по годам
Fig. 4. Yearly dynamics of publications and citations

Все включенные в анализ публикации были исследованы по следующим параметрам: тип изучаемых цен, применяемые методы исследования, ключевые факторы, влияющие на конкретный вид цен, пространственный масштаб (город, регион, страна). Анализ отобранных статей позволил выделить три основные группы публикаций в нашей выборке: цены на жилье, цены на землю и цены на продукты питания.

Остальные исследования в выборке включают работы по:

- пространственным ценовым индексам [21, 22];
- ценам на ресурсы: топливо [23], воду [24], древесину [25];
- ценам на услуги парковок [26];
- ценам в отелях [27];
- ценам на размещение в Airbnb [28];
- средним ценам на печатную рекламу [29];
- ценам на номера в отелях [30];
- соотношению арендной платы и стоимости жилья [31].

Цены на жилье. Наибольшая доля отобранных нами публикаций (57,14%) посвящена ценам на жилье. Были выделены различные факторы, влияющие на стоимость жилья, включая расположение объектов инфраструктуры (например, железнодорожных станций [32] или торговых центров [33]). Также исследователи изучают влияние политики, налогообложения, природных катастроф и уровня загрязнения воздуха на цены на жилье.

С помощью индуктивного подхода выявлены следующие группы факторов (табл. 3):

- архитектурные характеристики;
- локационные/географические переменные (окружение, смешанное землепользование);
- социально-экономические характеристики;

- наличие инфраструктуры (удобств)/неудобств;
- характеристики сделок.

Наряду с внутренними факторами, влияющими на цены на жилье в рамках конкретных пространственных образований (см. табл. 3), были обнаружены только 7 исследований из 27, которые учитывают пространственный контекст в анализе вариации цен на жилье. Эти работы используют методы пространственной эконометрики и направлены на изучение взаимосвязи между ценой жилья как зависимой переменной и ее детерминантами. Наиболее популярным методом в данном случае выступает географически взвешенная регрессия (GWR) и ее модификации, которые исследователи сравнивают с традиционной OLS-регрессией.

Таблица 3. Группы факторов, влияющих на цены на жилье

Table 3. Groups of factors influencing housing prices

| Группа факторов | Описание | Авторы |
|---|---|--|
| Архитектурные характеристики | Назначение дома, отделка, состояние системы отопления, основное назначение | De & Vupru, 2021, [34] |
| | Этажность, полезная площадь | Gao & Feng, 2023, [35] |
| | Соотношение ванных/спален, количество комнат, площадь дома, площадь земельного участка, парковочные места/гараж | Costello, Leishman, Rowley & Watkins, 2019, [36] |
| | Возраст дома, наличие гаража, площадь дома | Osland, Thorsen, Sandvig; Thorsen, 2016, [37] |
| | Количество спален, количество ванных комнат, общая площадь дома, газоснабжение, электрическое отопление, солнечное отопление, тип планировки | Banzhaf & Farooque, 2013, [38]; |
| | Площадь этажа, наличие парковочного места, коэффициент озеленения | Li, He, Xu, Wang, He, 2013, [39] |
| | Возраст апартаментов (в годах) с поправкой на капитальный ремонт, количество ванных комнат в апартаментах используется как показатель качества жилья, площадь апартаментов в квадратных метрах | Chica-Olmo, Cano-Guervos & Chica-Rivas, 2019, [40] |
| | Стоимость содержания имущества, коэффициент застройки, соотношение парковочных мест, общая площадь дома, тип дома, ориентация дома | Yuan; Wu; Dennis Wei; Wang, 2018, [41] |
| Локационные или географические переменные | Площадь зеленых насаждений (га), средняя температура января | Zou, 2019, [42] |
| | Смешанное землепользование | Gao & Feng, 2023, [35] |
| | Расстояние до места работы, расстояние до рынка, удаленность от лесного массива, расстояние до ж/д станции, медианная удаленность от культурных сооружений, ведомственных магазинов, больницы | De UK & Vupru, 2021, [43] |
| | Расстояние до делового центра, удаленность от районного центра, расстояние до станции скоростной ж/д, удаленность от станции метро, плотность автобусных остановок в радиусе 500 м, расстояние до парка/больницы/начальной школы/средней школы (км), степень смешанности землепользования (энтропия Шеннона), соотношение рабочих мест и жителей, плотность населения (чел./км ²) | Yuan; Wu; Dennis Wei; Wang, 2018, [41] |
| | Расстояние и время в пути на автомобиле/поезде, бинарная переменная наличия станции | De Bruyne & Van Hove, 2013, [44] |
| | Отношение общей площади застройки к площади этажа, доля зеленых зон от площади этажа, расположение в новом районе города, расстояние вдоль дорожной сети до ближайшего центрального делового района или субцентрального района, удаленность от станции метро вдоль дорожной сети до ближайшей станции метро | Li, He, Xu, Wang, He, 2013, [39] |
| | Ипотечная ставка, ставка налога на имущество, уровень безработицы, уровень вакантности | Rauf, Weber, 2022, [45] |
| | Средняя ставка заработной платы, доход, количество занятых в районе, банковская процентная ставка, локальные цены и доходы в зоне транспортной доступности, но по ценам в «близлежащих» районах | Fingleton, Fuerst, Szumilo, 2019, [46] |

| Группа факторов | Описание | Авторы |
|---|---|--|
| Локационные или географические переменные | Отработанные рабочие часы, доход, уровень безработицы, доля иностранных собственников жилья, значимость сельского хозяйства, плотность населения, ставка муниципального налога, средний возраст жилого фонда, спрос (прирост населения), предложение жилья, показатель удовлетворенности (удовлетворенность магазинами, удовлетворенность озеленением) | De Bruyne & Van Hove, 2013, [44] |
| | Личный доход, уровень безработицы, реальная процентная ставка, объемы ипотечного кредитования, инвестиции в жилищный сектор, налогообложения жилья относительно цены | Duan, Mishra, Parhi, Wolfe, 2019, [47] |
| Социально-экономические характеристики | Ежемесячная арендная плата, размер семьи, ежемесячный семейный доход, продолжительность проживания | De, U. K., & Vupru, V., 2021, [43] |
| | Средняя цена жилья, ВВП на душу населения, плотность населения, объем жилищных инвестиций, количество студентов вузов, количество людей с пенсионным страхованием | Zou, 2019, [42] |
| | Степень регулирующей политики | Zang & Gu, 2023 [48] |
| | Заработная плата, региональная экономическая активность | Coulson, McCoy, Shawn, McDonough, 2020, [49] |
| | Доступность рынка труда | Osland, Thorsen, Sandvig; Thorsen, 2016, [37] |
| | Уровень урбанизации, средняя заработная плата городских работников, доля арендаторов, цена земли, объем предложения жилой земли | Mou, He, Zhou, 2017, [50] |
| | Изменения реального дохода на душу населения, численность населения, жилищный фонд | Oikarinen & Engblom, 2016, [51] |
| | Доля иностранных собственников жилья, важность сельского хозяйства, плотность населения, ставка муниципального налога, спрос (прирост населения) | De Bruyne & Van Hove, 2013, [44] |
| | Фактическая цена продажи, оценочная стоимость, самооцененная стоимость, ежемесячная арендная плата, площадь дома | Banzhaf & Farooque, 2013, [38] |
| | Евклидово расстояние в метрах от центрального делового района | Chica-Olmo, Cano-Guervos & Chica-Rivas, 2019, [40] |
| Характеристики сделки | Количество корректировок цены | Gao & Feng, 2023, [35] |
| | Объем сделок | Zang & Gu, 2023, [48] |
| | Проданные единицы/средняя цена, созданные единицы | Rauf, Weber; 2022, [45] |
| Удобства / Неудобства | Детские сады, начальные школы, публичные библиотеки, учреждения для пожилых, базовые медицинские учреждения, спортивные объекты сообщества и городские парки | Choi, Jeung, Park 2021, [52] |
| | Качество школ, качество воздуха, близость к побережью, наличие бассейна, время в пути на работу | Banzhaf & Farooque, 2013, [38] |
| | Расстояние до фермерского рынка, расстояние до магазина повседневного спроса, расстояние по дорожной сети до ближайшего магазина повседневного спроса, расстояние до детского сада, до района начальной школы (бинарная переменная), до района средней школы (бинарная переменная), расстояние до больницы (бинарная переменная), расстояние до парка (бинарная переменная), расстояние до озера, а также до реки Янцзы и горы Цзыцзинь (бинарная переменная), расстояние по дорожной сети до ближайшего озера, также до реки Янцзы и горы Цзыцзинь (логарифмированное), расстояние до ближайшего правительственного учреждения | Yuan; Wu; Dennis Wei; Wang, 2018, [41] |
| | Минимальное расстояние до больницы, услуги общественного транспорта, наличие начальной школы в радиусе 800 м, наличие средней школы в радиусе 1000 м, наличие детского сада в радиусе 1000 м, наличие зеленой зоны в радиусе 500 м, наличие буферной зоны в радиусе 500 м от железной дороги, наличие банка в радиусе 500 м, наличие деревни в радиусе 500 м, количество автобусных маршрутов в радиусе 500 м | Li, He, Xu, Wang, He, 2013, [39] |

Gao & Feng [35] сравнили традиционную OLS-гедонистическую модель с GWR для выявления влияния пространственной вариации смешанного землепользования на цены жилья. Их выводы подтвердили большую точность географически взвешенной регрессии при расчетах. Zang & Gu (2023) изучили вза-

имосвязь между рыночными настроениями и ценами на жилье, установив, что индекс настроений, рассчитанный с использованием моделей пространства состояний, обладает большей статистической значимостью по сравнению с индексом, полученным методом главных компонент.

Bagheri & Shaykh-Baygloo [53] проанализировали пространственную вариацию цен на жилье в столичном районе Истафан с помощью GWR, выявив статистически значимую связь между «умными» индексами роста и ценами на жилье. Choi, Jeung & Park [52] использовали GWR для оценки влияния социального капитала (ключевых объектов инфраструктуры) на официальные цены жилых зданий, подтвердив преимущество GWR перед OLS.

Zou et al. [42] одновременно использовали модели OLS и локальную GWR для изучения пространственной вариации зависимости между загрязнением и ценами на жилье в 282-х городах Китая. Vruyne & Nove [44] включили пространственную матрицу в модель, выявив отрицательное влияние географических барьеров на цены. Wu и соавторы [54] разработали мультимасштабную GWR (MGWR) для учета временных и пространственных масштабов, доказав ее эффективность в объяснении вариации цен.

Два исследования в выборке изучали нестабильную природу вариации цен без идентификации детерминант. Chasco и соавторы [55] применили пространственный сканирующий подход для выявления нестабильностей на рынке жилья Гранады, подтвердив его полезность для эмпирической спецификации моделей. Coulson и соавторы [49] сравнили динамику цен в регионах, пострадавших от стихийных бедствий, не обнаружив различий в ценах до катастроф, но зафиксировав значительное снижение в первые два года после них.

Таким образом, исследования детерминант цен преимущественно используют GWR для учета пространственного контекста, тогда как работы, фокусирующиеся на выявлении вариации, применяют различные методы (анализ главных компонент, процедуру Любела-Бартена, сканирующий подход, метод Монте-Карло, SAR-модели). Среди базовых методов также выделяются:

- гедонистические ценовые модели (De & Vupru [43]; Costello и соавторы [36]);
- метод различий в различиях (DID) [43, 49];
- множественная линейная регрессия [52, 45];
- метод пространственных динамических панелей [47];
- ГИС-технологии [56, 39].

Преобладающие пространственные масштабы анализа:

- города (Zang & Gu [48]; Chasco и соавторы [55] и др.);
- страны (Duan и соавторы [47]; Banzhaf & Farooque [38]);
- столичные регионы (Rauf & Weber [45]; Coulson и соавторы [49]).

Цены на землю. Второй кластер исследований посвящен ценам на землю (основные характеристики представлены в табл. 4). В отличие от исследований цен на жилье, мы не обнаружили описательных работ, посвященных измерению пространственных тенденций вариации цен на землю. Четыре публикации изучают пространственный контекст цен на землю через призму их детерминант.

Таблица 4. Основные характеристики исследований, посвященных ценам на землю
Table 4. Basic characteristics of studies devoted to land price

| Тип цены | Детерминанты цены | Методы | Пространственный масштаб | Авторы |
|---|--|--|--------------------------------|---|
| Цена сельскохозяйственных земель на аукционах (победившая ставка) | Размер, пастбищные угодья, прочие земли, качество почвы, индекс засухи | APV-модель | Восточная Германия (страна) | Seifert & Hüttel, 2023, [57] |
| Цена жилой земли | Коммерческие и образовательные объекты, природные удобства, общественный транспорт | Алгоритмы машинного обучения | Ухань (город в Китае) | Zhang et al., 2021, [58] |
| Цена промышленной земли | Население, индекс локализации, арендуемые земли, налоги | Географически взвешенная регрессия | Китай (страна) | Yang et al., 2020, [59] |
| Цена земли (рыночная цена сделки) | Локальные удобства, такие как загрязнение, макроэкономические шоки, эффекты от линии метро | Метод «разности в разностях»: модели с изменяющимися во времени эффектами воздействия (WPT-модели) | Берлин (город) | Ahlfeldt, Nitsch, Volker and Wendland, 2019, [60] |
| Цена промышленной земли | Рыночный потенциал, свобода торговли, стоимость рабочей силы, энергоснабжения, местный дефицит | Модель географически взвешенной регрессии (GWR) | Китай (страна) | Chen, Shen, Wang, 2018, [61] |
| Цена жилой земли | Расстояние до центра города, площадь земельного участка, расстояние до основной дорожной сети, расстояние до общественного транспорта, расстояние до населенных пунктов, расстояние до медицинского учреждения, расстояние до образовательного учреждения, расстояние до объекта связи, расстояние до социально-экономического объекта | Многомерное и временное картографирование, множественный линейный регрессионный анализ | Джокьякарта (город), Индонезия | Noorhadi, Marhaento, 2019 |

Большинство авторов, изучающих вариацию цен на землю, исследуют ее ключевые детерминанты. Ян и соавторы (Yang et al., 2020) использовали географически взвешенную регрессию (GWR) для выявления пространственной вариации цен на землю и ключевых факторов ее определяющих. Их результаты показали, что эффекты различных факторов (налоговый эффект, эффект аренды земли, индекс локализации и население) варьировались в Китае в пространстве и времени.

Чжан и соавторы (Zhang et al., 2021) разработали модели прогнозирования цен на землю на основе алгоритмов машинного обучения для выявления распределения цен на жилую землю. Они установили, что наличие коммерческих и образовательных объектов являются ключевыми факторами изменения цен на жилую землю в Ухане.

Применив географически взвешенную регрессию, Чэнь и соавторы (Chen, Shen, Wang, 2018) доказали, что цены на промышленные земли пространственно различаются между районами, при этом связь между ценами на промышленные земли и индексом масштаба промышленной диффузии оказалась отрицательной. Рахарджо и Мархаенто [62] изучили изменения цен на землю в Джокарте, установив влияние на цену расстояния до центра города и до центров социально-экономической активности. Зайферт и Хюттель [57] применили модель аукциона, используя данные о продаже сельскохозяйственных земель, и выявили неоднородность частных оценок, придя к выводу, что победитель аукциона может не быть участником с наивысшей ценой земли.

Сравнение методов показало, что модели географически взвешенной регрессии могут использоваться как для измерения пространственной вариации цен на землю, так и на жилье. Детерминанты цен на землю тесно связаны с типом земельного участка: цены на жилую землю зависят от местной инфраструктуры и планировки территории, тогда как цены на промышленные земли определяются рыночными условиями и ресурсообеспеченностью. Наиболее популярными пространственными единицами анализа в исследованиях цен на землю являются город и страна. Не было выявлено исследований, посвященных описательным тенденциям вариации цен на землю и их измерению.

Цены на продовольствие. Мы проанализировали пять публикаций, посвященных ценам на продовольствие (табл. 5).

Кристенсен и Брончетти (Christensen & Bronchetti) [63] исследуют географические различия в ценах на продукты питания среди домохозяйств-получателей SNAP (программа продовольственной помощи в США), чтобы выяснить, как высокие или низкие местные цены влияют на номинальную справедливость распределения пособий. Авторы установили, что домохозяйства, совершающие покупки в

разных районах, демонстрируют более низкую покупательную способность по программе SNAP.

Ачоджа и Гбигби (Achoja & Gbibi) [64] анализируют пространственную вариацию цен на свежие томаты на крупных и мелких рынках, используя коэффициент вариации. Исследование выявило, что межсезонные колебания цен более значительны, чем различия между регионами, причем эти сезонные колебания негативно влияют на потребителей томатов.

Беккерман и Тейлор (Bekkerman & Taylor) [66] разработали модель пространственной конкуренции для оценки стратегий ценообразования элеваторов и их поведенческих стратегий, исследуя пространственно-временную вариацию местных цен на пшеницу. В качестве исходных данных использовались ежедневные котировки цен на зерно.

Катчова и Сант'Анна (Katchova & Sant'Anna) [67] эмпирически оценили влияние производства этанола на цены кукурузы, сравнивая округа с этаноловыми заводами и без них. Авторы не обнаружили устойчивой причинно-следственной связи между наличием заводов и ценами на кукурузу, хотя соседние округа получали выгоды от близости к этаноловым производствам.

Камфенхаут, Лекутер и Д'Экселль (Campenhout, Lecoutere, & D'Exelle) [65] изучили краткосрочные эффекты сезонной волатильности цен в сельском хозяйстве, уделив особое внимание временным разрывам между продажами и закупками. Результаты показали, что крупные домохозяйства получали меньше выгод от ценовых колебаний по сравнению с мелкими.

В отличие от исследований вариации цен на землю и жилье, работы по ценам на продовольствие носят преимущественно описательный характер и фокусируются на пространственных и сезонных колебаниях цен. Это демонстрирует различие в методологических подходах: если для анализа цен на жилье и землю преимущественно применялись GWR и метод различий в различиях (DID), то исследования продовольственных цен в основном использовали описательную статистику и множественную регрессию [63, 64].

Обсуждение результатов

В выборке проанализированных публикаций нами выявлено 28 исследований из 49, посвященных пространственному измерению цен на жилье. Доля работ, изучающих цены на землю, составила 12,24% (6 исследований из 49), тогда как остальные исследования касались цен на продовольствие (5 исследований из 49), цен на размещение в Airbnb (1), цен на топливо (1), ценообразования номеров в отелях (3), средних цен на печатную рекламу (1), цен на древесину (1), соотношения арендной платы и стоимости (1), цен на парковку (1) и цен на воду (1).

Таблица 5. Ключевые характеристики исследований цен на продовольствие
 Table 5. Key characteristics of studies devoted to food price

| Тип цен на продовольствие | Детерминанты цен | Методы | Кейс-стади | Вариация цен | Авторы |
|---|--|---|--|---|---|
| Цены местной потребительской корзины (определенный набор продуктов питания) | Размер домохозяйства, процент от федерального уровня бедности, доход домохозяйства, время в пути до основного магазина, тип продовольственной безопасности, количество детей в домохозяйстве, наличие пожилого члена домохозяйства | Среднее, медиана, минимальное и среднее значение стоимости корзины | США | Географическая вариация | Christensen & Bronchetti, 2020, [63] |
| Свежие томаты | Транспортные расходы, расстояние, однородность продукта, вмешательство профсоюзов, переговорная сила покупателей, переговорная сила поставщиков, уровень лояльности покупателей, продолжительность хранения продукта в магазине перед продажей (дни) | Анкетирование (первичные данные), среднее значение, t-критерий Стьюдента и множественная регрессия (линейная, полулогарифмическая, экспоненциальная, двойная логарифмическая) | Нигерия | Пространственная и сезонная вариация цен | Achoja & Gbigbi, 2019, [64] |
| Цены на пшеницу (ежедневные котировки наличных цен) | Наличная цена, предлагаемая перегрузочным элеватором, наличная цена, предлагаемая обычным элеватором, расстояние, которое фермер должен преодолеть до перегрузочного элеватора, транспортные расходы на единицу продукции | Пространственная модель базиса цен на пшеницу | США (штаты Канзас и Монтана) | Кросс-секционная, временная и пространственная вариация | Bekkerman & Taylor [66] |
| Фьючерсные цены на кукурузу | Время доставки, наличие завода по производству этанола, энтропия, размер фермы, наличие промежуточной фермы, наличие коммерческой фермы, доход от фьючерсных контрактов на кукурузу, образование оператора, типы ферм | Непространственные и пространственные модели «разность-в-разностях» | США | — | Katchova & Sant'Anna [67] |
| Цены на кукурузу | Количество проданной кукурузы, общие потребительские расходы | Непараметрические регрессии | Регион Иринга в Южном нагорье Танзании | Межвременная вариация цен | Campenhout, Lecoutere, & D'Exelle, [65] |

Ключевыми факторами, влияющими на цены на жилье, являются архитектурные характеристики, локальные или географические переменные (окружение, смешанное землепользование), социально-экономические характеристики, наличие удобств/неудобств и характеристики сделок. Наиболее популярным пространственным масштабом при рассмотрении вариации и паттернов цен на жилье являются города, а наиболее распространенными методами анализа – географически взвешенная регрессия, гедонистические ценовые модели и модели «разность в разностях» (DID). При этом мы не обнаружили значительного количества работ по ценам на жилье, которые рассматривали бы пространственную вариацию как характери-

стику волатильности. Большинство публикаций посвящено изучению факторов, влияющих на цены на жилье.

Другая группа исследований в нашей выборке охватывает цены на землю, где географически взвешенная регрессия и DID-модели сохраняют свое методологическое доминирование. Это направление исследований рассматривает землепользование в двух аспектах. Первый относится к промышленным землям, где ключевыми ценовыми характеристиками являются рыночный потенциал, энергоснабжение, стоимость рабочей силы [46], индекс локализации, арендуемые земли, налоги (Yang et al., 2020), тогда как цены на жилую землю зависят от факторов, аналогичных влияющим на цены на жилье: коммерче-

ские и образовательные учреждения, природные удобства, общественный транспорт [58]; различные виды удаленности от инфраструктуры – расстояние до общественного транспорта, расстояние до медицинских учреждений, расстояние до образовательных учреждений [62].

Третье крупное направление исследований посвящено детерминантам цен на продовольствие. В этой группе публикаций пространственная вариация является ключевым компонентом исследований различных продуктов питания (свежие томаты, цены на пшеницу, контрактные цены на кукурузу, цены на маис). Преобладает национальный уровень, а ценовые детерминанты зависят от конкретного продукта питания. Эти исследования изучают пространственные и сезонные паттерны вариации цен.

Наше исследование имеет следующие ограничения. Мы не рассматриваем пространственные цены ресурсов и факторы, влияющие на них, поскольку большинство этих вопросов касаются взаимоотношений между производителями и правительством. Данное исследование не рассматривает пространственные равновесные цены, ценовую конвергенцию и связанные с ними теоретические модели.

Заключение

Наши результаты показывают, что в исследованиях факторов, влияющих на различные типы пространственных цен, уделялось недостаточное внимание изучению пространственной вариации. Лишь ограниченное число эмпирических исследований, связанных с ценами на продовольствие, рассматривают пространственную вариацию.

Наше исследование внесло вклад в существующую литературу посредством:

- 1) выделения набора детерминант, влияющих на цены жилья, земли и продовольствия;
- 2) выявления методов моделирования в исследовании цен;
- 3) определения пространственного масштаба исследуемых единиц.

Мы пришли к выводу, что наиболее перспективным направлением для изучения пространственной вариации цен являются цены на продовольствие. В отношении методов исследования и данных мы считаем, что для будущих исследований наиболее подходящими будут микроданные домохозяйств, детальные региональные данные о ценах и в качестве перспективного инструмента выступают пространственные модели, поскольку они доказали свою эффективность.

Список источников

1. Girardin E., Sall Ch. A.T. Inflation Dynamics of Franc-Zone Countries Determinants, Co-movements and Spatial Interactions // *Open Economies Review*. 2018, no. 29(2), pp. 295–320. <https://doi.org/10.1007/s11079-017-9456-x>
2. Spatial quantitative analysis of garlic price data based / Wu G., Zhang C., Liu P., Ren W., Zheng Y., Guo F., Chen X., Higgs R. // *Computers, Materials & Continua*. 2019, no. 58(1), pp. 183–195. <https://doi.org/10.32604/cmc.2019.03792>
3. Cunha A.M., Loureiro R. Housing price dynamics and elasticities: Portugal's conundrum // *National Accounting Review*. 2024, no. 6(1), pp. 75–94. <https://doi.org/10.3934/NAR.2024004>
4. Gray D. Housing market activity diffusion in England and Wales // *National Accounting Review*. 2023, no. 5(2), pp. 125–144. <https://doi.org/10.3934/nar.2023008>
5. Kirikos D. G. An evaluation of quantitative easing effectiveness based on out-of-sample forecasts // *National Accounting Review*. 2022, no. 4(4), pp. 378–389. <https://doi.org/10.3934/nar.2022021>
6. Динамика пространственной корреляции цен на овощи и фрукты / Тимирьянова В.М., Лакман И.А., Красносельская Д.Х., Столь А.В. // *Пространственная экономика*. 2023. Т. 19. № 2. С. 94–125. <https://doi.org/10.14530/se.2023.2.094-125>
7. Spatial dependence of average prices for product categories and its change over time: Evidence from daily data / Timiryanova V., Lakman I., Prudnikov V., Krasnoselskaya D. // *Forecasting*. 2022, no. 5(1), pp. 102–126. <https://doi.org/10.3390/forecast5010004>
8. Gluschenko K. Distribution dynamics of Russian regional prices // *Empirical Economics*. 2016, no. 51(3), pp. 1193–1213. <https://doi.org/10.1007/s00181-015-1039-3>
9. Ступникова А.В. Пространственное поведение в Российской Федерации в 2003–2012 гг. // *Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз*. 2014. Т. 3. № 33. С. 248–261. <https://doi.org/10.15838/esc/2014.3.33.19>
10. Sinelnikov-Murylev S.G., Perevyshev Y.N., Trunin P.V. Inflation differences in the Russian regions: An empirical analysis // *Economy of Region*. 2020, no. 16(2), pp. 479–493. <https://doi.org/10.17059/2020-2-11>
11. Кириллов А.М. Инфляция цен на продовольственные товары в регионах России: пространственный анализ // *Пространственная экономика*. 2017. № 4. С. 41–58. <https://doi.org/10.14530/se.2017.4.041-058>
12. Иванова В.И. Конвергенция цен на рынке зерна: исторический аспект // *Пространственная экономика*. 2015. № 3. С. 34–56. <https://doi.org/10.14530/se.2015.3.034-056>
13. Drivers of grain price volatility: a cursory critical review / Santeramo F.G., Lamonaca E., Contò F., Nardone G., Stasi A. // *Agricultural Economics*. 2018, no. 64(8), pp. 347–356. <https://doi.org/10.17221/55/2017-agricecon>
14. Gilbert C.L., Morgan C.W. Food price volatility // *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2010, no. 365(1554), pp. 3023–3034. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0139>
15. Li N., Li R., Nuttapong J. Factors affect the housing prices in China: a systematic review of papers indexed in Chinese Science Citation Database // *Property Management*. 2022, no. 40(5), pp. 780–796. <https://doi.org/10.1108/pm-11-2020-0078>
16. Implications for long COVID: A systematic review and meta-aggregation of experience of patients diagnosed with COVID-19 / Zheng X., Qian M., Ye X., Zhang M., Zhan C., Li H., Luo T. // *Journal of Clinical Nursing*. 2024, no. 33(1), pp. 40–57. <https://doi.org/10.1111/jocn.16537>

17. Ten S., Raga J.A., Aznar F.J. Epibiotic fauna on cetaceans worldwide: A systematic review of records and indicator potential // *Frontiers in Marine Science*. 2022, no. 9. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.846558>
18. Meerow S., Newell J.P., Stults M. Defining urban resilience: A review // *Landscape and Urban Planning*. 2016, no. 147, pp. 38–49. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.11.011>
19. Heyman A.V., Law S., Berghauer P.M. How is location measured in housing valuation? A systematic review of accessibility specifications in hedonic price models // *Urban Science*. 2018, no. 3(1). <https://doi.org/10.3390/urbansci3010003>
20. Rapsomnikis G., Hallam D., Conforti P. Market Integration and Price Transmission in Selected Food and Cash Crop Markets of Developing Countries: Review and Applications // *Commodity Market Review*. 2003, pp. 51–75. Режим доступа: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstream/s/a41bf51e-e53f-4b0e-aff-dc0aa4c7f5fa/content> (date of access 17.06.2025)
21. Majumder A., Ray R., Santra S. The spatial price map of India drawn using pseudo unit values // *Indian Growth and Development Review*. 2020, no. 13(3), pp. 537–560. <https://doi.org/10.1108/igdr-09-2019-0092>
22. Mishra A., Ray R. Spatial Variation in Prices and Expenditure Inequalities in Australia // *Economic Record*. 2014, no. 90(289), pp. 137–159. <https://doi.org/10.1111/1475-4932.12109>
23. Bergeaud A., Raimbault J. An empirical analysis of the spatial variability of fuel prices in the United States // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2020, no. 132, pp. 131–143. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.10.016>
24. Payne M.T., Smith M.G. Price determination and efficiency in the market for water rights in New Mexico's Middle Rio Grande Basin // *International Journal of Water Resources Development*. 2013, no. 29(4), pp. 588–604. <https://doi.org/10.1080/07900627.2012.730670>
25. Xiao H., Kant S., Xie Y. A spatial hedonic stumpage analysis of standing timber auctions in Jiangxi Province of China // *Forest Policy and Economics*. 2018, no. 96(3), pp. 63–74. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2018.08.004>
26. Evaluation of spatial heterogeneity in the sensitivity of on-street parking occupancy to price change / Pu Z., Li Z., Ash J., Zhu W., Wang Y. // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2017, no. 77, pp. 67–79. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.01.008>
27. Latinopoulos D. Using a spatial hedonic analysis to evaluate the effect of sea view on hotel prices // *Tourism Management*. 2018, no. 65, pp. 87–99. <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2017.09.019>
28. How to better incorporate geographic variation in Airbnb price modeling? / Jiang Y., Zhang H., Cao X., Wei G., & Yang Y. // *Tourism Economics*. 2023, no. 29(5), pp. 1181–1203. <https://doi.org/10.1177/13548166221097585>
29. Chiou L., Kafali E., Nilay, Rysman M. Internet use, competition, and geographical rescoping in Yellow Pages advertising // *Information Economics and Policy*. 2020, no. 52, 100867. <https://doi.org/10.1016/j.infoecopol.2020.100867>
30. Mohammed I., Guillet B.D., Law R. Modeling dynamic price dispersion of hotel rooms in a spatially agglomerated tourism city for weekend and midweek stays // *Tourism Economics*. 2019, no. 25(8), pp. 1245–1264. <https://doi.org/10.1177/1354816619826829>
31. Lee C., Park K. Analyzing the rent-to-price ratio for the housing market at the micro-spatial scale // *International Journal of Strategic Property Management*. 2018, no. 22(3), pp. 223–233. <https://doi.org/10.3846/ijspm.2018.1416>
32. Geng B., Bao H., Liang Y. A study of the effect of a high-speed rail station on spatial variations in housing price based on the hedonic model // *Habitat International*. 2015, no. 49, pp. 333–339. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2015.06.005>
33. Wang B. Is Walmart the same as ten years ago? A non-parametric difference-in-differences analysis of Walmart development. *Regional Science and Urban Economics*. 2023, no. 99, pp. 103863. <https://doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2022.103863>
34. De UK, Vupru V. Housing demand and its determinant in a small town in India. *J Urban Plan Dev*. 2021, no. 147(1), 05020036. DOI:10.1061/(asce)up.1943-5444.0000647.
35. Gao Y., Feng C. Impact of mixed land use on housing prices, spatial differentiation and implications: Empirical analysis based on Qingdao // *Applied Spatial Analysis and Policy*. 2023, no. 16(4), pp. 1345–1370. <https://doi.org/10.1007/s12061-023-09514-1>
36. Drivers of spatial change in urban housing submarkets / Costello G, Leishman C, Rowley S, Watkins C. // *The Geographical Journal*. 2019, no. 185(4), pp. 432–446. <https://doi.org/10.1111/geoj.12303>
37. Osland L., Thorsen I.S., Thorsen I. Accounting for local spatial heterogeneities in housing market studies // *Journal of Regional Science*. 2016, no. 56(5), pp. 895–920. <https://doi.org/10.1111/jors.12281>
38. Banzhaf H.S., Farooque O. Interjurisdictional housing prices and spatial amenities: Which measures of housing prices reflect local public goods? // *Regional Science and Urban Economics*. 2013, no. 43(4), pp. 635–648. <https://doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2013.0>
39. Using GIS and Hedonic in the modelling of spatial variation of housing price in Xiamen city / Li Y., He L., Xu W., Wang H., He Z. // *International Review for Spatial Planning and Sustainable Development*. 2013, no. 1(4), pp. 29–42. https://doi.org/10.14246/irspsd.1.4_29
40. Chica-Olmo J., Cano-Guervos R., Chica-Rivas M. Estimation of housing price variations using spatio-temporal data // *Sustainability*. 2019, no. 11(6), 1551. <https://doi.org/10.3390/su11061551>
41. Policy change, amenity, and spatiotemporal dynamics of housing prices in Nanjing, China / Yang F., Wu J., Wei Y.D., Wang L. // *Land Use Policy*. 2018, no. 75, pp. 225–236. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.03.045>
42. Zou Y. Air Pollution and Housing Prices across Chinese Cities // *Journal of Urban Planning and Development*. 2019, no. 145(4), 04019012. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)UP.1943-5444.0000517](https://doi.org/10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000517)
43. De U.K., Vupru V. Housing demand and its determinant in a small town in India // *Journal of Urban Planning and Development*. 2021, no. 147(1), 05020036. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)up.1943-5444.0000647](https://doi.org/10.1061/(asce)up.1943-5444.0000647)
44. De Bruyne K., Van H.J. Explaining the spatial variation in housing prices: an economic geography approach // *Applied Economics*. 2013, no. 45(13), pp. 1673–1689. <https://doi.org/10.1080/00036846.2011.636021>

45. Rauf M.A., Weber O. Housing sustainability: The effects of speculation and property taxes on house prices within and beyond the jurisdiction // *Sustainability*. 2022, no. 14(12), 7496. <https://doi.org/10.3390/su14127496>
46. Fingleton B., Fuerst F., Szumilo N. Housing affordability: Is new local supply the key? // *Environment and Planning A: Economy and Space*. 2019, no. 51(1), pp. 25–50. <https://doi.org/10.1177/0308518X18798372>
47. How Effective are Policy Interventions in a Spatially-Embedded International Real Estate Market? / Duan K., Mishra T., Parhi M., Wolfe S. // *The Journal of Real Estate Finance and Economics*. 2019, no. 58(4), pp. 596–637. <https://doi.org/10.1007/s11146-018-9654-3>
48. Zang T., Gu H. State-space modelling of housing sentiment for regressing changes of real estate prices following short-term control policy in China // *Sustainability*. 2023, no. 15(16), 12660. <https://doi.org/10.3390/su151612660>
49. Coulson N.E., McCoy S.J., McDonough I.K. Economic diversification and the resiliency hypothesis: Evidence from the impact of natural disasters on regional housing values // *Regional Science and Urban Economics*. 2020, no. 85, 103581. <https://doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2020.103581>
50. Mou Y., He Q., Zou Bo. Detecting the Spatially Non-Stationary Relationships between Housing Price and Its Determinants in China: Guide for Housing Market Sustainability // *Sustainability*. 2017, no. 9(10), 1826. <https://doi.org/10.3390/su9101826>
51. Oikarinen E., Engblom J. Differences in housing price dynamics across cities: A comparison of different panel model specifications // *Urban Studies*. 2016, no. 53(11), pp. 2312–2329. <https://doi.org/10.1177/0042098015589883>
52. Choi Y., Jeung I., Park J. Comparative Analysis of Spatial Impact of Living Social Overhead Capital on Housing Price by Residential type // *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2021, no. 25(3), pp. 1056–1065. <https://doi.org/10.1007/s12205-021-1250-z>
53. Bagheri B., Shaykh-Baygloo R. Spatial analysis of urban smart growth and its effects on housing price: The case of Isfahan, Iran // *Sustainable Cities and Society*. 2021, pp. 68, 102769. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102769>
54. Multiscale geographically and temporally weighted regression: exploring the spatiotemporal determinants of housing prices / Wu C., Ren F., Hu W., Du Q. // *International Journal of Geographical Information Science*. 2018, no. 33(3), pp. 489–511. <https://doi.org/10.1080/13658816.2018.1545158>
55. Chasco C., Le Gallo J., López F.A. A scan test for spatial groupwise heteroscedasticity in cross-sectional models with an application on houses prices in Madrid // *Regional Science and Urban Economics*. 2018, no. 68, pp. 226–238. <https://doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2017.10.015>
56. Mimis A., Rovolis A., Stamou M. Property valuation with artificial neural network: the case of Athens // *Journal of Property Research*. 2013, no. 30(2), pp. 128–143. <https://doi.org/10.1080/09599916.2012.755558>
57. Seifert S., Hüttel S. Is there a risk of a winner's curse in farmland auctions? // *European Review of Agricultural Economics*. 2023, no. 50(3), pp. 1140–1177. <https://doi.org/10.1093/erae/jbad002>
58. Modeling fine-scale residential land price distribution: An experimental study using open data and machine learning / Zhang P., Hu S., Li W., Zhang C., Yang S., Qu S. // *Applied Geography* (Sevenoaks, England). 2021, no. 129, 102442. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2021.102442>
59. Spatio-Temporal Nonstationary Effects of Impact Factors on Industrial Land Price in Industrializing Cities of China / Yang S., Hu S., Li W., Zhang C., Song D. // *Sustainability*. 2020, no. 12(7), 2792. <https://doi.org/10.3390/su12072792>
60. Ahlfeldt G.M., Nitsch V., Wendland N. Ease vs. noise: Long-run changes in the value of transport (dis)amenities // *Journal of Environmental Economics and Management*. 2019, no. 98, 102268. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2019.102268>
61. Chen W., Shen Y., Wang Y. Does industrial land price lead to industrial diffusion in China? An empirical study from a spatial perspective // *Sustainable Cities and Society*. 2018, no. 40, pp. 307–316. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.04.019>
62. Rahardjo N., Marhaento H. Spatio-Temporal Visualization of Land Price Change in the Greater Yogyakarta City, Java, Indonesia // *International Journal of Geoinformatics*. 2019, no. 14(4), pp. 47–59. Режим доступа: <http://journals.sfu.ca/ijg/index.php/journal/article/view/1233> (date of access 17.06.2025)
63. Christensen G., Bronchetti E.T. Local food prices and the purchasing power of SNAP benefits // *Food Policy*. 2020, no. 95, 101937. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2020.101937>
64. Achoja F., Gbigbi T. Taze Domatesin Mekansal ve Mevsimsel Fiyat Varyasyonları: Nijerya Örneği // *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi*. 2019, no. 29(2), pp. 330–338. <https://doi.org/10.29133/yyutbd.464931>
65. Van Campenhout B., Lecoutere E., D'Exelle B. Inter-temporal and spatial price dispersion patterns and the well-being of maize producers in southern Tanzania // *Journal of African Economies*. 2015, no. 24(2), pp. 230–253. <https://doi.org/10.1093/jae/ejv002>
66. Bekkerman A., Taylor M. The role of spatial density and technological investment on optimal pricing strategies in the grain handling industry // *Review of Industrial Organization*. 2020, no. 57(1), pp. 27–58. <https://doi.org/10.1007/s11151-019-09725-2>
67. Katchova A.L., Sant'Anna A.C. Impact of Ethanol Plant Location on Corn Revenues for U.S. Farmers // *Sustainability*. 2019, no. 11(22), 6512. <https://doi.org/10.3390/su11226512>
68. Kitenge E.M., Morshed A.K. Price convergence among Indian cities: The role of linguistic differences, topography, and aggregation // *Journal of Asian Economics*. 2019, no. 61, pp. 34–50. <https://doi.org/10.1016/j.asieco.2019.02.002>

References

1. Girardin E., Sall Ch. A.T. Inflation dynamics of franc-zone countries determinants, co-movements and spatial interactions. *Open Economies Review*. 2018;(29(2)):295–320. <https://doi.org/10.1007/s11079-017-9456-x>
2. Wu G., Zhang C., Liu P., Ren W., Zheng Y., Guo F., Chen X., Higgs R. Spatial quantitative analysis of garlic price data based. *Computers, Materials & Continua*. 2019;(58(1)):183–195. <https://doi.org/10.32604/cmc.2019.03792>
3. Cunha A.M., Loureiro R. Housing price dynamics and elasticities: Portugal's conundrum. *National Accounting Review*. 2024;(6(1)):75–94. <https://doi.org/10.3934/NAR.2024004>

4. Gray D. Housing market activity diffusion in England and Wales. *National Accounting Review*. 2023;(5(2)):125-144. <https://doi.org/10.3934/nar.2023008>
5. Kirikos D.G. An evaluation of quantitative easing effectiveness based on out-of-sample forecasts. *National Accounting Review*. 2022;(4(4)):378-389. <https://doi.org/10.3934/nar.2022021>
6. Timiryanova V.M., Lakman I.A., Krasnoselskaya D.Kh., Stol A.V. Dynamics of spatial dependences of prices for vegetables and fruits. *Prostranstvennaya ekonomika [Spatial Economics]*. 2023;(19(2)):94-125. <https://doi.org/10.14530/se.2023.2.094-125>. (In Russ.)
7. Timiryanova V., Lakman I., Prudnikov V., Krasnoselskaya D. Spatial dependence of average prices for product categories and its change over time: Evidence from daily data. *Forecasting*. 2022;(5(1)):102-126. <https://doi.org/10.3390/forecast5010004>
8. Gluschenko K. Distribution dynamics of Russian regional prices. *Empirical Economics*. 2016;(51(3)):1193-1213. <https://doi.org/10.1007/s00181-015-1039-3>.
9. Stupnikova A.V. Spatial behavior of prices in the Russian Federation in 2003–2012. *Ekonomicheskie i sotsialnye peremeny: fakty, tendentsii, prognoz [Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast]*. 2014;(3(33)):248-261. <https://doi.org/10.15838/esc/2014.3.33.19>. (In Russ.)
10. Sinelnikov-Murylev S.G., Perevyshehin Y.N., Trunin P.V. Inflation differences in the Russian regions: An empirical analysis. *Economy of Region*. 2020;(16(2)):479-493. <https://doi.org/10.17059/2020-2-11>.
11. Kirillov A.M. Spatial analysis of food inflation in Russian regions. *Prostranstvennaya ekonomika [Spatial Economics]*. 2017;(4):41-58. <https://doi.org/10.14530/se.2017.4.041-058>. (In Russ.)
12. Ivanova V.I. Convergence of prices on the grain market: the historical aspect. *Prostranstvennaya ekonomika [Spatial Economics]*. 2015;(3):34-56. <https://doi.org/10.14530/se.2015.3.034-056>. (In Russ.)
13. Santeramo F.G., Lamonaca E., Contò F., Nardone G., Stasi A. Drivers of grain price volatility: a cursory critical review. *Agricultural Economics*. 2018;(64(8)):347-356. <https://doi.org/10.17221/55/2017-agricecon>
14. Gilbert C.L., Morgan C.W. Food price volatility. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2010;(365(1554)):3023-3034. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0139>
15. Li N., Li R., Nuttapong J. Factors affect the housing prices in China: a systematic review of papers indexed in Chinese Science Citation Database. *Property Management*. 2022;(40(5)):780-796. <https://doi.org/10.1108/pm-11-2020-0078>
16. Zheng X., Qian M., Ye X., Zhang M., Zhan C., Li H., Luo T. Implications for long COVID: A systematic review and meta-aggregation of experience of patients diagnosed with COVID-19. *Journal of Clinical Nursing*. 2024;(33(1)):40-57. <https://doi.org/10.1111/jocn.16537>
17. Ten S., Raga J.A., Aznar F.J. Epibiotic fauna on cetaceans worldwide: A systematic review of records and indicator potential. *Frontiers in Marine Science*. 2022;(9). <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.846558>
18. Meerow S., Newell J.P., Stults M. Defining urban resilience: A review. *Landscape and urban planning*. 2016;(147):38-49. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.11.011>
19. Heyman A.V., Law S., Berghauer P.M. How is location measured in housing valuation? A systematic review of accessibility specifications in hedonic price models. *Urban Science*. 2018;(3(1)). <https://doi.org/10.3390/urbansci3010003>
20. Rapsomnikis G., Hallam D., Conforti P. Market Integration and Price Transmission in Selected Food and Cash Crop Markets of Developing Countries: Review and Applications. *Commodity Market Review*. 2003;51-75. Available at: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/a41bf51e-e53f-4b0e-affd-dc0aa4c7f5fa/content> (Accessed June 17, 2025)
21. Majumder A., Ray R., Santra S. The spatial price map of India drawn using pseudo unit values. *Indian Growth and Development Review*. 2020;(13(3)):537-560. <https://doi.org/10.1108/igdr-09-2019-0092>
22. Mishra A., Ray R. Spatial Variation in Prices and Expenditure Inequalities in Australia. *Economic Record*. 2014;(90(289)):137–159. <https://doi.org/10.1111/1475-4932.12109>
23. Bergeaud A., Raimbault J. An empirical analysis of the spatial variability of fuel prices in the United States. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2020;(132):131-143. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.10.016>
24. Payne M.T., Smith M.G. Price determination and efficiency in the market for water rights in New Mexico's Middle Rio Grande Basin. *International Journal of Water Resources Development*. 2013;(29(4)):588-604. <https://doi.org/10.1080/07900627.2012.730670>
25. Xiao H., Kant S., Xie Y. A spatial hedonic stumpage analysis of standing timber auctions in Jiangxi Province of China. *Forest Policy and Economics*. 2018;(96(3)):63-74. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2018.08.004>
26. Pu Z., Li Z., Ash J., Zhu W., Wang Y. Evaluation of spatial heterogeneity in the sensitivity of on-street parking occupancy to price change. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2017;(77):67-79. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.01.008>
27. Latinopoulos D. Using a spatial hedonic analysis to evaluate the effect of sea view on hotel prices. *Tourism Management*. 2018;(65):87-99. <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2017.09.019>
28. Jiang, Y., Zhang, H., Cao, X., Wei, G., & Yang, Y. How to better incorporate geographic variation in Airbnb price modeling? *Tourism Economics*. 2023;(29(5)):1181-1203. <https://doi.org/10.1177/13548166221097585>
29. Chiou, L., Kafali E. Nilay, Rysman M. Internet use, competition, and geographical rescaling in Yellow Pages advertising. *Information Economics and Policy*. 2020;(52):100867. <https://doi.org/10.1016/j.infoecopol.2020.100867>
30. Mohammed I., Guillet B.D., Law R. Modeling dynamic price dispersion of hotel rooms in a spatially agglomerated tourism city for weekend and midweek stays. *Tourism Economics*. 2019;(25(8)):1245-1264. <https://doi.org/10.1177/1354816619826829>
31. Lee C., Park K. Analyzing the rent-to-price ratio for the housing market at the micro-spatial scale. *International Journal of Strategic Property Management*. 2018;(22(3)):223-233. <https://doi.org/10.3846/ijspm.2018.1416>
32. Geng B., Bao H., Liang Y. A study of the effect of a high-speed rail station on spatial variations in housing price based on the hedonic model. *Habitat International*. 2015;(49):333-339. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2015.06.005>

33. Wang B. Is Walmart the same as ten years ago? A non-parametric difference-in-differences analysis of Walmart development. *Regional Science and Urban Economics*. 2023;(99):103863. <https://doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2022.103863>
34. De UK, Vupru V. Housing demand and its determinant in a small town in India. *J Urban Plan Dev*. 2021;147(1):05020036. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)up.1943-5444.0000647](https://doi.org/10.1061/(asce)up.1943-5444.0000647).
35. Gao Y., Feng C. Impact of mixed land use on housing prices, spatial differentiation and implications: Empirical analysis based on Qingdao. *Applied spatial analysis and policy*. 2023;(16(4)):1345-1370. <https://doi.org/10.1007/s12061-023-09514-1>
36. Costello G, Leishman C, Rowley S., Watkins C. Drivers of spatial change in urban housing submarkets. *The Geographical Journal*. 2019;(185(4)):432-446. <https://doi.org/10.1111/geoj.12303>
37. Osland L., Thorsen I.S., Thorsen I. Accounting for local spatial heterogeneities in housing market studies. *Journal of Regional Science*. 2016;(56(5)):895-920. <https://doi.org/10.1111/jors.12281>
38. Banzhaf H.S., Farooque O. Interjurisdictional housing prices and spatial amenities: Which measures of housing prices reflect local public goods? *Regional Science and Urban Economics*. 2013;(43(4)):635-648. <https://doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2013.0>
39. Li Y., He L., Xu W., Wang H., He Z. Using GIS and Hedonic in the modelling of spatial variation of housing price in Xiamen city. *International Review for Spatial Planning and Sustainable Development*. 2013;(1(4)):29-42. https://doi.org/10.14246/irpsd.1.4_29
40. Chica-Olmo J., Cano-Guervos R., Chica-Rivas M. Estimation of housing price variations using spatio-temporal data. *Sustainability*. 2019;11(6):1551. <https://doi.org/10.3390/su11061551>
41. Yang F., Wu J., Wei Y.D., Wang L. Policy change, amenity, and spatiotemporal dynamics of housing prices in Nanjing, China. *Land Use Policy*. 2018;(75):225-236. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.03.045>
42. Zou Y. Air pollution and housing prices across Chinese cities. *Journal of urban planning and development*. 2019;(145(4)):04019012. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)UP.1943-5444.0000517](https://doi.org/10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000517)
43. De U.K., Vupru V. Housing demand and its determinant in a small town in India. *Journal of Urban Planning and Development*. 2021;(147(1)):05020036. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)up.1943-5444.0000647](https://doi.org/10.1061/(asce)up.1943-5444.0000647)
44. De Bruyne K., Van H.J. Explaining the spatial variation in housing prices: an economic geography approach. *Applied Economics*. 2013;(45(13)):1673-1689. <https://doi.org/10.1080/00036846.2011.636021>
45. Rauf M.A., Weber O. Housing sustainability: The effects of speculation and property taxes on house prices within and beyond the jurisdiction. *Sustainability*. 2022;(14(12)):7496. <https://doi.org/10.3390/su14127496>
46. Fingleton B., Fuerst F., Szumilo N. Housing affordability: Is new local supply the key? *Environment and planning A: economy and space*. 2019;(51(1)):25-50. <https://doi.org/10.1177/0308518X18798372>
47. Duan K., Mishra T., Parhi M., Wolfe S. How effective are policy interventions in a spatially-embedded international real estate market? *The journal of real estate finance and economics*. 2019;(58(4)):596-637. <https://doi.org/10.1007/s11146-018-9654-3>
48. Zang T., Gu H. State-space modelling of housing sentiment for regressing changes of real estate prices following short-term control policy in China. *Sustainability*. 2023;(15(16)):12660. <https://doi.org/10.3390/su151612660>
49. Coulson N.E., McCoy S.J., McDonough I.K. Economic diversification and the resiliency hypothesis: Evidence from the impact of natural disasters on regional housing values. *Regional Science and Urban Economics*. 2020;(85):103581. <https://doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2020.103581>
50. Mou Y., He Q., Zou Bo. Detecting the spatially non-stationary relationships between housing price and its determinants in China: guide for housing market sustainability. *Sustainability*. 2017;(9(10)):1826. <https://doi.org/10.3390/su9101826>
51. Oikarinen E., Engblom J. Differences in housing price dynamics across cities: A comparison of different panel model specifications. *Urban Studies*. 2016;(53(11)):2312-2329. <https://doi.org/10.1177/0042098015589883>
52. Choi Y., Jeung I., Park J. Comparative Analysis of Spatial Impact of Living Social Overhead Capital on Housing Price by Residential type. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2021;(25(3)):1056-1065. <https://doi.org/10.1007/s12205-021-1250-z>
53. Bagheri B., Shaykh-Baygloo R. Spatial analysis of urban smart growth and its effects on housing price: The case of Isfahan, Iran. *Sustainable Cities and Society*. 2021;(68):102769. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102769>
54. Wu C., Ren F., Hu W., Du Q. Multiscale geographically and temporally weighted regression: exploring the spatiotemporal determinants of housing prices. *International Journal of Geographical Information Science*. 2018;(33(3)):489-511. <https://doi.org/10.1080/13658816.2018.1545158>
55. Chasco C., Le Gallo J., López F.A. A scan test for spatial groupwise heteroscedasticity in cross-sectional models with an application on houses prices in Madrid. *Regional Science and Urban Economics*. 2018;(68):226-238. <https://doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2017.10.015>
56. Mimis A., Rovolis A., Stamou M. Property valuation with artificial neural network: the case of Athens. *Journal of Property Research*. 2013;(30(2)):128-143. <https://doi.org/10.1080/09599916.2012.755558>
57. Seifert S., Hüttel S. Is there a risk of a winner's curse in farmland auctions? *European Review of Agricultural Economics*. 2023;(50(3)):1140-1177. <https://doi.org/10.1093/erae/jbad002>
58. Zhang P., Hu S., Li W., Zhang C., Yang S., Qu S. Modeling fine-scale residential land price distribution: An experimental study using open data and machine learning. *Applied Geography (Sevenoaks, England)*. 2021;(129):102442. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2021.102442>
59. Yang S., Hu S., Li W., Zhang C., Song D. Spatio-Temporal nonstationary effects of impact factors on industrial land price in industrializing cities of China. *Sustainability*. 2020;(12(7)):2792. <https://doi.org/10.3390/su12072792>
60. Ahlfeldt G.M., Nitsch V., Wendland N. Ease vs. noise: Long-run changes in the value of transport (dis)amenities. *Journal of Environmental Economics and Management*. 2019;(98):102268. <https://doi.org/10.1016/j.jeeem.2019.102268>
61. Chen W., Shen Y., Wang Y. Does industrial land price lead to industrial diffusion in China? An empirical study from a

- spatial perspective. *Sustainable Cities and Society*. 2018;(40):307-316. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.04.019>
62. Rahardjo N., Marhaento H. Spatio-Temporal Visualization of Land Price Change in the Greater Yogyakarta City, Java, Indonesia. *International Journal of Geoinformatics*. 2019;(14(4)):47-59. Available at: <http://journals.sfu.ca/ijg/index.php/journal/article/view/1233> (Accessed June 17, 2025)
63. Christensen G., Bronchetti E.T. Local food prices and the purchasing power of SNAP benefits. *Food Policy*. 2020;(95):101937. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2020.101937>
64. Achoja F., Gbigbi T. Taze Domatesin Mekansal ve Mevsimsel Fiyat Varyasyonları: Nijerya Örneği. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi*. 2019;(29(2)):330-338. <https://doi.org/10.29133/yyutbd.464931>
65. Van Campenhout B., Lecoutere E., D'Exelle B. Inter-temporal and spatial price dispersion patterns and the well-being of maize producers in southern Tanzania. *Journal of African Economies*. 2015;(24(2)):230-253. <https://doi.org/10.1093/jae/ejv002>
66. Bekkerman A., Taylor M. The role of spatial density and technological investment on optimal pricing strategies in the grain handling industry. *Review of Industrial Organization*. 2020;(57(1)):27-58. <https://doi.org/10.1007/s11151-019-09725-2>
67. Katchova A.L., Sant'Anna A.C. Impact of Ethanol Plant Location on Corn Revenues for U.S. Farmers. *Sustainability*. 2019;(11(22)):6512. <https://doi.org/10.3390/su11226512>
68. Kitenge E.M., Morshed A.K. Price convergence among Indian cities: The role of linguistic differences, topography, and aggregation. *Journal of Asian Economics*. 2019;(61):34-50. <https://doi.org/10.1016/j.asieco.2019.02.002>

Поступила 16.06.2025; принята к публикации 13.11.2025; опубликована 31.03.2026
Submitted 16/06/2025; revised 13/11/2025; published 31/03/2026

Красносельская Дина Хадимовна – кандидат экономических наук, старший научный сотрудник, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия.
Email: dina-hamzina@mail.ru. ORCID 0000-0002-1668-2937

Тимирьянова Венера Маратовна – доктор экономических наук, главный научный сотрудник, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия.
Email: 79174073127@mail.ru. ORCID 0000-0002-1004-0722

Прудников Вадим Борисович – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия.
Email: prudnikov.bgu@mail.ru. ORCID 0000-0001-9892-3257

Гайнцева Екатерина Сергеевна – кандидат технических наук, доцент, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия.
Email: gaintsevae@yandex.ru. ORCID 0000-0001-5828-7241

Dina Kh. Krasnoselskaya – PhD (Eng.), Senior Researcher, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia.
Email: dina-hamzina@mail.ru. ORCID 0000-0002-1668-2937

Venera M. Timiryanova – DrSc (Eng.), Chief Researcher, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia.
Email: 79174073127@mail.ru. ORCID 0000-0002-1004-0722

Vadim B. Prudnikov – PhD (Eng.), Associate Professor, Senior Researcher, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia.
Email: prudnikov.bgu@mail.ru. ORCID 0000-0001-9892-3257

Ekaterina S. Gaintseva – PhD (Eng.), Associate Professor, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia.
Email: gaintsevae@yandex.ru. ORCID 0000-0001-5828-7241



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 65.011
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-1-192-200

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ИННОВАЦИЙ НА ПРОИЗВОДСТВЕННОМ ЭТАПЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА НАУКОЕМКОЙ ПРОДУКЦИИ

Амосов А.И.^{1,2}, Кудрявцева С.С.¹, Харитонов Д.В.²

¹ Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия

² АО «ОНПП „Технология” им. А.Г. Ромашина», Обнинск, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Вопросы перехода к импортозамещению и достижению технологического лидерства обострил вопрос разработки и внедрения технологических инноваций в наукоемких секторах промышленности. Это стало основанием для разработки системных технологических инноваций на наукоемких предприятиях, в том числе на предприятиях по изготовлению керамических изделий. Данная проблема особенно актуальна с низкой или средней технологичностью при значительной степени участия высококвалифицированного человеческого ресурса, где инновационная деятельность является ключевым фактором повышения конкурентоспособности и обеспечения устойчивого экономического роста. **Цель работы.** Цель исследования заключается в разработке методики оценки эффективности технологических инноваций, которые позволят усовершенствовать процесс изготовления керамических изделий. **Используемые методы.** В работе применена методика оценки условной производственно-экономической эффективности, основанная на расчете коэффициента вероятных потерь и сопоставлении полученного технического результата с затратами на его достижение. **Новизна.** Предложен комплексный подход к инновационному развитию наукоемкого производства, включающий четыре направления модернизации: оптимизацию процесса входного контроля комплектующих с горизонтальной интеграцией в структуру цеха; усовершенствованную технологию приготовления герметика с использованием диссольвера в условиях вакуума; внедренную методику визуально-оптического неразрушающего контроля; внедренный программный автоматизированный управленческий комплекс для контроля технологических процессов. Новизна разработанных решений подтверждена получением шести патентов на изобретения Российской Федерации. **Результат.** Применение инновационного подхода позволило существенно снизить уровень технологических потерь, повысить качество и надежность выпускаемой продукции, оптимизировать использование ресурсов и обеспечить стабильное выполнение договорных обязательств. **Практическая значимость.** Разработанная методика может быть адаптирована для оценки эффективности технологических инноваций в других отраслях промышленности. Комплексный подход к решению производственных задач, сочетающий технологические инновации с организационными и управленческими решениями, обеспечивает высокую рентабельность инновационных проектов, что особенно актуально в условиях ограниченных финансовых ресурсов предприятий машиностроительной отрасли.

Ключевые слова: технологические инновации, условная производственно-экономическая эффективность, наукоемкая продукция, оптимизация процесса входного контроля комплектующих, усовершенствованная технология приготовления герметика, визуально-оптический контроль, программный автоматизированный управленческий комплекс

© Амосов А.И., Кудрявцева С.С., Харитонов Д.В., 2026

Для цитирования

Амосов А.И., Кудрявцева С.С., Харитонов Д.В. Оценка эффективности технологических инноваций на производственном этапе жизненного цикла наукоемкой продукции // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №1. С. 192-200. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-192-200>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF TECHNOLOGICAL INNOVATIONS AT THE PRODUCTION STAGE OF THE HIGH-TECH PRODUCTS LIFE CYCLE

Amosov A.I.^{1,2}, Kudryavtseva S.S.¹, Kharitonov D.V.²

¹ Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

² JSC ONPP Technology named after A.G. Romashin, Obninsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The issues of transition to import substitution and achievement of technological leadership have been aggravated by the issue of development and implementation of technological innovations in knowledge-intensive sectors of industry. This has become the basis for development of systemic technological innovations at knowledge-intensive enterprises including those manufacturing ceramic products. This problem is especially relevant with low or medium technological effectiveness with a significant degree of participation of highly qualified human resources, where innovation activity is a key factor in increasing competitiveness and ensuring sustainable economic growth. **Objectives.** The study is aimed at developing a methodology for assessing the effectiveness of technological innovations that will improve the process of manufacturing ceramic products. **Methods Applied.** The paper uses a methodology for estimating conditional production and economic efficiency based on calculating the coefficient of probable losses and comparing the technical result obtained with the costs of achieving it. **Novelty.** A comprehensive approach to the innovative development of high-tech production is proposed, including four areas of modernization: optimization of the input control of components with horizontal integration into the structure of the workshop; improved technology for preparing sealant using a dissolver under vacuum conditions; an implemented method of visual-optical non-destructive testing; implemented automated management software package for process control. The novelty of the developed solutions is confirmed by the receipt of six patents for inventions of the Russian Federation. **Result.** The use of an innovative approach has made it possible to significantly reduce the level of technological losses, improve the quality and reliability of manufactured products, optimize the use of resources and ensure stable fulfillment of contractual obligations. **Practical Relevance.** The developed methodology can be adapted to assess the effectiveness of technological innovations in other industries. A comprehensive approach to solving production problems, combining technological innovations with organizational and management solutions, ensures high profitability of innovation projects, which is especially relevant in the context of limited financial resources of enterprises in the mechanical engineering industry.

Keywords: technological innovations, conditional production and economic efficiency, high-tech products, optimization of the input control of components, improved technology for the preparation of sealants, visual-optical control, automated management software package

For citation

Amosov A.I., Kudryavtseva S.S., Kharitonov D.V. Assessment of the Efficiency of Technological Innovations at the Production Stage of the High-Tech Products Life Cycle. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 1, pp. 192-200. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-192-200>

Введение

Современное наукоемкое производство характеризуется высокой конкуренцией и непрерывным изменением внешних влияющих факторов, что требует от предприятий постоянного развития и совершенствования производственных процессов. Данная проблема особенно актуальна для наукоемких предприятий с низкой или средней технологичностью при значительной степени участия высококвалифицированного человеческого ресурса. Для таких предприятий инновационная деятельность является ключевым фактором повышения конкурентоспособности и обеспечения устойчивого экономического роста [1].

В условиях развития инновационной деятельности анализ экономической эффективности новых тех-

нических решений и организационных изменений должен проводиться с учетом особенностей конкретного типа производства [2]. Каждый тип производства отличается определенным набором признаков, которые и обуславливают специфику организационных, управленческих и технических решений.

Производство наукоемких керамических изделий предполагает постоянный контроль технологического процесса для обеспечения его стабильности с целью сохранения требуемого уровня качества выпускаемой продукции [3, 4], а постоянно возрастающие требования к качеству и надежности наукоемких керамических изделий обуславливают необходимость генерации и внедрения новых идей, направленных на снижение технологических потерь и повышение эффективности производства [5, 6].

В статье рассматриваются четыре инновационных решения – технологические инновации, позволившие существенно сократить технологические потери и повысить качество выпускаемой продукции [7]. Проведена оценка экономической эффективности, которая является условной и определена в основном содержании, а в качестве основного показателя используется коэффициент вероятных потерь, с помощью которого показана целесообразность применения инновационного подхода в наукоемком производстве.

Материалы и методы исследования

Методологической основой исследования служит системный подход к анализу эффективности технологических инноваций, предполагающий рассмотрение производственного процесса как единой системы взаимосвязанных элементов. В рамках данного подхода инновационная деятельность рассматривается не как изолированное явление, а как комплекс взаимодополняющих мероприятий, направленных на оптимизацию различных этапов производственного цикла. Центральным методологическим принципом исследования является концепция условной производственно-экономической эффективности.

Под условной производственно-экономической эффективностью следует понимать некоторую количественную характеристику, которая определяется соотношением полученного технического результата к затратам на его достижение. Условная производственно-экономическая эффективность является сравнительным показателем, который характеризует преимущества технологического процесса после внедрения новшеств перед тем же самым процессом без применения инновационного подхода. Следует понимать, что несмотря на то, что такой сравнительный показатель выражен в денежном эквиваленте, он не является прямым источником выгоды и не коррелирует непосредственно с прибылью предприятия в результате применения инновационного подхода. Такой производственно-экономический эффект перераспределяет ресурсы из настоящего в будущее и снижает затраты на изготовление наукоемких изделий в перспективе. Другими словами, ресурсы, которые могли быть израсходованы в текущем производ-

стве в виде технологических потерь, будут направлены на дальнейшее производство в виде доли от запланированных ресурсов для формирования дальнейшего производства. На рис. 1 изображена схема, поясняющая процесс формирования условной производственно-экономической эффективности.

На схеме изображены материальные потоки текущего, дальнейшего и будущего производства, которые соответствуют состоянию процесса без внедрения новшеств и усовершенствованного процесса в результате инновационной деятельности наукоемкого промышленного предприятия. Текущий объем технологических потерь уменьшается и, как следствие, уменьшаются необходимые ресурсы для дальнейшего и будущего производства, что на схеме показано уменьшенным диаметром красной, зеленой и синей окружности соответственно. Производственно-экономический эффект, представленный в работе, достигается за счет полного исключения либо снижения уровня технологических потерь в наукоемком производстве керамических изделий. В общем виде расчет условной производственно-экономической эффективности произведен по формуле

$$S = \sum_{j=ГВИ}^{ГРЭ} K_{вп} \cdot \sum_i V_j^i \cdot S_j^i - S_{и} - \sum_{j=ГВИ}^{ГРЭ} (S_{ни} + S_{ти} + S_{рид}), \quad (1)$$

- где j – количество периодов после внедрения инновации;
- i – количество типов изделий с одинаковыми технологическими потерями;
- $K_{вп}$ – коэффициент вероятных потерь;
- S_j^i – средняя стоимость изделия одного типа в конкретном периоде;
- V_j^i – объем производства одного типа изделия в конкретном периоде;
- $S_{и}$ – единовременные затраты на проведение работ по внедрению инновации;
- $S_{ни}$ – затраты на поддержание инновации;
- $S_{ти}$ – затраты трудоемкости дополнительных операций при внедрении инновации;
- $S_{рид}$ – затраты на поддержание результатов интеллектуальной деятельности.

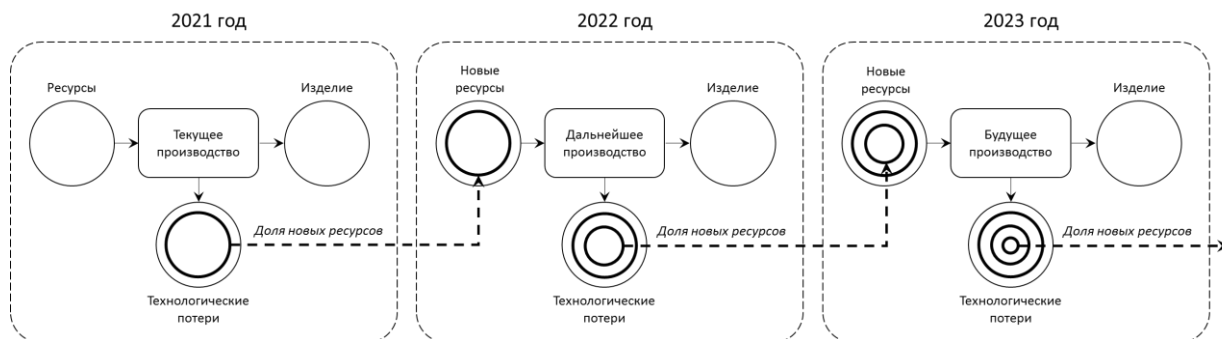


Рис. 1. Схема формирования условной производственно-экономической эффективности (составлено авторами)
 Fig. 1. Scheme of formation of conditional production and economic efficiency (compiled by the authors)

Формула содержит суммарную стоимость гипотетических технологических потерь изделий в период с года внедрения инновации (ГВИ) до года расчета эффективности (ГРЭ), за вычетом стоимости реализации и регулярных затрат на содержание инновационного проекта.

Для оценки условной производственно-экономической эффективности предлагается сопоставление со стоимостью гипотетически разрушенных изделий на окончательном этапе производственного цикла либо в процессе производства, которая рассчитывается с использованием коэффициента вероятных потерь $K_{ВП}$, применяя который представляется возможным рассчитать, какие потери будут при увеличении либо снижении объемов производства, если не принять своевременные меры по устранению причины возникновения потерь.

Коэффициент вероятных потерь можно определить следующим образом:

$$K_{ВП} = \frac{1}{i} \cdot \sum \frac{n_i}{V_i}, \quad (2)$$

где i – количество периодов, принимаемых в расчет до внедрения инновации;

n_i – количество технологических потерь за i -й период;

V_i – количество изготовленных изделий за i -й период.

Коэффициент вероятных потерь $K_{ВП}$ – эмпирическая величина, определяемая экспертным методом путем анализа технологических потерь, вызванных влиянием негативного фактора, на устранение которого направлена внедренная инновация.

Принципиальное отличие данного подхода от традиционных методов оценки экономической эффективности заключается в том, что условная производственно-экономическая эффективность является сравнительным показателем, характеризующим преимущества усовершенствованного технологического процесса перед исходным процессом без применения инновационного подхода.

Основная задача статьи – показать оценку условной производственно-экономической эффективности применения инноваций в наукоемком производстве. В работе рассматриваются одно инновационное организационно-управленческое решение и три основные внедренные инновационные идеи, позволившие существенно сократить технологические потери и повысить качество выпускаемой продукции.

Полученные результаты и их обсуждение

Технологическая инновация 1: оптимизация процесса входного контроля комплектующих. Наукоемкие керамические изделия представляют собой конструкцию из керамического корпуса и металлического каркаса, соединенных посредством слоя специального герметика. Выбор керамики в качестве материала обусловлен ее высокими механическими

характеристиками, эрозионной устойчивостью, термостойкостью и низкой теплопроводностью, что является неоспоримым преимуществом для многих наукоемких предприятий области машиностроения. Металлические каркасы – это закупаемые комплектующие изделия, которые изготавливаются из прецизионного сплава с низким температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР), что обеспечивает сохранение геометрических размеров в условиях высоких температур эксплуатации и способствует предотвращению разрушения хрупкого керамического корпуса.

Изначально процесс входного контроля металлических комплектующих, проводимый отделом технического контроля (ОТК), имел ряд проблем: недостаточное техническое оснащение при контроле геометрических параметров, отсутствие необходимого оборудования для контроля герметичности, дефицит производственных площадей, вероятность использования «чужих» комплектующих для сборки изделия, а также непрозрачность и асинхронность производственного и бухгалтерского учета [9].

Для решения этих проблем была проведена комплексная работа, включающая следующие этапы:

1. Организация специализированного участка входного контроля, который был горизонтально интегрирован в структуру цеха по изготовлению изделий.

2. Аprobация и внедрение координатно-измерительной машины для повышения точности и достоверности контроля геометрических параметров.

3. Разработка, изготовление и внедрение нового оборудования для проверки герметичности по заданным критериям.

4. Синхронизация производственного и бухгалтерского учета комплектующих.

Эти меры позволили значительно сократить потери, связанные с избыточной транспортировкой (более 75 ч в год), перемещением работников (более 180 ч в год) и ожиданием (более 40 ч в год) [8, 10]. Но самое значимое было достигнуто в существенном улучшении качества входного контроля металлических комплектующих, что позволило выявлять несоответствие формы и размеров, а также безусловную отбраковку негерметичных каркасов на ранних стадиях, что предотвращает их использование в производстве и, как следствие, исключает технологические потери на окончательных этапах производства. На **рис. 2** изображен логистический процесс изготовления наукоемких керамических изделий с учетом внедренной инновации в формате «как было» и «как стало».

Организация участка входного контроля металлических комплектующих позволила исключить технологические потери, логистические издержки и осуществить прозрачный синхронный учет использования закупаемой продукции, а условный производственно-экономический эффект от внедрения участка входного контроля, полученный из формулы (1), составил ориентировочно от 7 до 9 млн руб. за период с 2018 по 2023 годы.

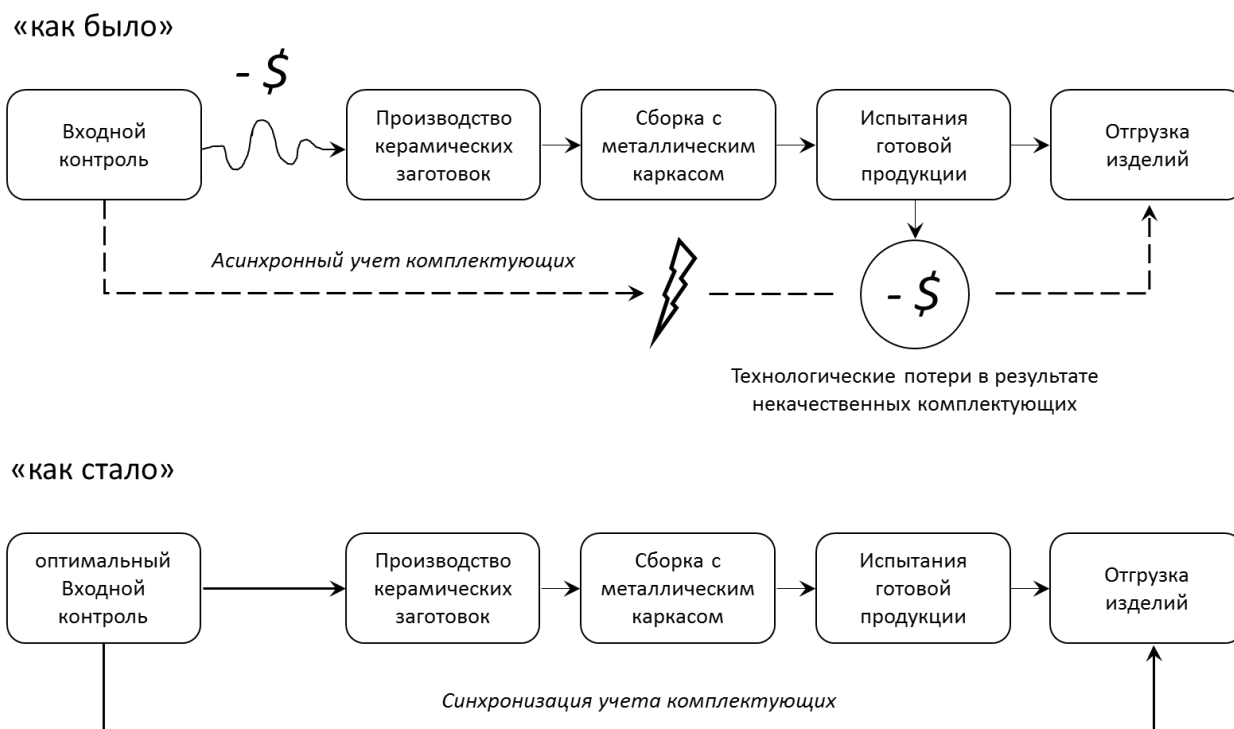


Рис. 2. Схема влияния первой инновации на процесс изготовления изделий (составлено авторами)
 Fig. 2. Scheme of the influence of the first innovation on the manufacturing process (compiled by the authors)

Технологическая инновация 2: усовершенствованная технология приготовления герметика. Соединение керамического корпуса и металлического каркаса происходит через слой эластичного адгезива, в роли которого выступает кремнийорганический герметик. Помимо основной функции соединения, герметик выполняет ряд дополнительных функций: создает полную герметизацию внутреннего объема изделия, обеспечивает прочность, достаточную для сопротивления силовым нагрузкам, и снижает вибродинамические нагрузки благодаря своей эластичности, а также препятствует разрушению изделия в результате давления металлического каркаса при расширении металла под действием высоких температур в случаях несоблюдения поставщиками геометрических размеров [8].

Процесс перемешивания компонентов герметика является ключевым при его приготовлении. Ввиду высокой вязкости пасты и малого количества остальных компонентов, равномерное перемешивание представляет определенные трудности. Неравномерное перемешивание приводит к наличию градиента физико-технических свойств по объему герметика, что может стать причиной снижения надежности клеевого соединения. При ручном способе перемешивания разброс значений прочности клеевого соединения мог

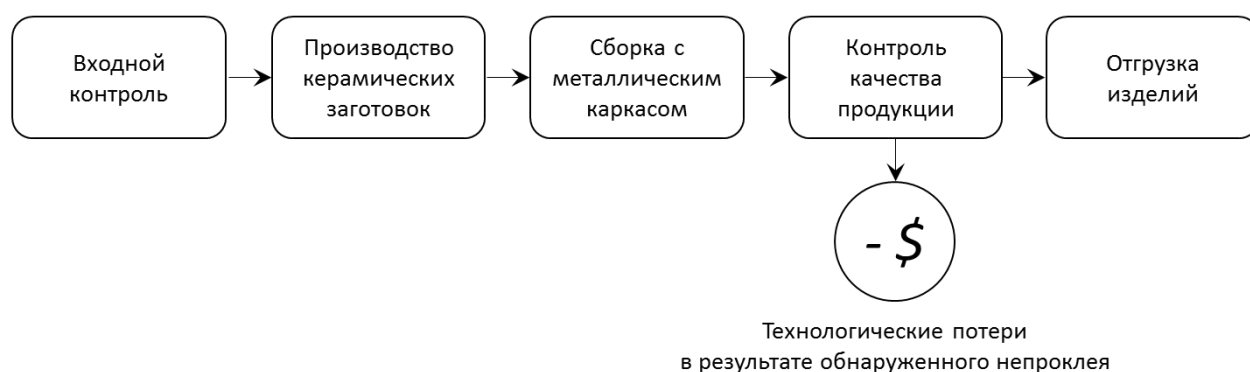
достигать 40%. Также при перемешивании герметика в него попадал воздух, который перерастал в полости в структуре после вулканизации, что значительно снижало прочность соединения.

Для решения этих проблем был внедрен аппарат для автоматического перемешивания герметика в условиях вакуума – диссольвер. Диссольвер не только обеспечил равномерное перемешивание компонентов, но и позволил увеличить прочность клеевого соединения в системе керамика-металл до 17% и уменьшить разброс значений прочности на 37%, а также сократить количество воздушных пузырей в структуре герметика [10]. На рис. 3 изображен логистический процесс изготовления наукоемких керамических изделий с учетом внедренной инновации в формате «как было» и «как стало».

Для оптимизации процесса перемешивания было исследовано влияние кинематических параметров (скорости и времени) на прочность соединения и подобран оптимальный режим работы диссольвера. Новизна и оригинальность разработанного способа подтверждена патентом РФ №2640778 от 11.01.2018 [8].

Применение усовершенствованной технологии приготовления герметика позволило снизить уровень технологических потерь на окончательном этапе сборки с 3,4 до 0,03%.

«как было»



«как стало»

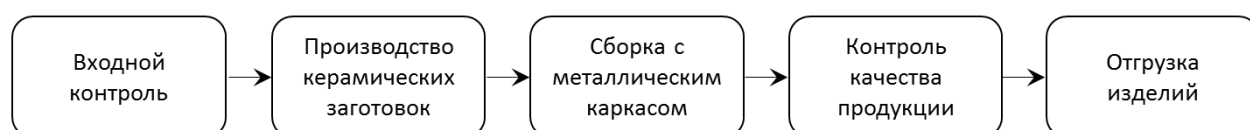


Рис. 3. Схема влияния второй инновации на процесс изготовления изделий (составлено авторами)

Fig. 3. Scheme of the influence of the second innovation on the manufacturing process (compiled by the authors)

Технологическая инновация 3: визуально-оптический контроль. В процессе изготовления наукоемких керамических изделий существует риск образования дефектов на ранних стадиях производства. Особенно критичным является этап механической обработки, когда происходит удаление существенной доли материала керамической заготовки, что может привести к выявлению дефектов, которые образовались в теле заготовки на предыдущих операциях (помол, формование, обжиг).

До внедрения инновации технологический процесс допускал определенный уровень технологических потерь на окончательном этапе изготовления изделия. Это приводило к значительным потерям, особенно с учетом роста объемов производства. Для решения этой проблемы была разработана и внедрена инновационная методика визуально-оптического неразрушающего контроля (ВОК), позволяющая выявлять поверхностные и подповерхностные дефекты значительно меньших размеров и с большей вероятностью, чем при традиционном визуальном осмотре.

Суть метода заключается в пропитывании керамических заготовок водой для повышения степени оптической прозрачности в видимом световом спектре с целью увеличения контрастности и уменьшения размера минимально выявляемого дефекта, а осмотр изделия проводится как в прошедшем, так и в отраженном свете.

Внедрение ВОК позволило исключить случаи разрушения изделий на окончательном этапе подтверждения надежности. Особенно важно отметить своевременность внедрения данной инновации: при трехкратном увеличении объема производства изде-

лий случаи их разрушения на испытаниях прекратились полностью.

Дальнейшим развитием инновации стало внедрение и совершенствование производственного ВОК после операции внутренней механической обработки керамических заготовок. Это позволило исключить экономически неоправданную обработку наружной поверхности для 10,6% керамических заготовок, содержащих внутренние дефекты, что привело к значительной экономии времени работы дорогостоящего оборудования и операторов этого оборудования.

Кроме того, своевременное обнаружение дефектов на внутренней поверхности позволило осуществлять доработку с целью их устранения за счет оставшегося технологического припуска на наружной поверхности. Несмотря на увеличение времени операции механической обработки в среднем на 15%, эффективность устранения выявленных дефектов достигла 80%. При этом технологические потери перераспределились с окончательных испытаний уже собранных изделий, которые прошли все стадии производства на этапе изготовления керамических заготовок, где стоимость технологических потерь значительно ниже (уменьшенный диаметр на схеме).

На рис. 4 изображен логистический процесс изготовления наукоемких керамических изделий с учетом внедренной инновации в формате «как было» и «как стало».

Новизна и оригинальность разработанного способа и его развития подтверждена четырьмя патентами (например, [8, 10]), а условный производственно-экономический эффект от внедрения ВОК за период с 2016 по 2023 годы мог составить от 2,5 до 7 млн руб. в год.



Рис. 4. Схема влияния третьей инновации на процесс изготовления изделий (составлено авторами)
 Fig. 4. Scheme of the influence of the third innovation on the manufacturing process (compiled by the authors)

Технологическая инновация 4: программный автоматизированный управленческий комплекс. С ужесточением требований к расходу комплектующих для изготовления наукоемких керамических изделий возникла необходимость использовать комплектующие только с изделиями в рамках одного договора и ежеквартально проводить сверку их расходования. Для решения этой проблемы был разработан и внедрен специализированный интерфейс программного аппаратного управленческого комплекса (ПАУК).

ПАУК представляет собой программно-аппаратный комплекс для автоматизации управления технологическими процессами на базе ИС и предназначен для получения оперативной информации о результатах работы производственного подразделения. Технически ПАУК реализован в виде установленных на каждом участке и связанных по локальной вычислительной сети терминалов со специальным программным обеспечением, учитывающим все действия и операции в технологическом процессе изготовления наукоемких керамических изделий. Новизна и оригинальность разработанного комплекса подтверждена патентом РФ №2699330 от 06.01.2018 [10].

Использование ПАУКа позволило:

1. Контролировать и управлять технологическими процессами на новом уровне, что привело к сокращению временных затрат на диспетчеризацию и инвентаризацию.

2. Избегать ошибок, обусловленных человеческим фактором, и использовать комплектующие только в рамках договора поставки изделий.

3. Вести полный учет комплектующих и формировать ежеквартальные отчеты.

4. Хранить результаты входного контроля и сопроводительную документацию для каждого металлического каркаса.

5. Дистанционно отслеживать наличие и качество поступивших каркасов.

Особенно важной функцией ПАУКа стала «защита от непреднамеренных ошибок» при сборке изделия с комплектующими из другого договора, с истекшим сроком годности или не прошедшими входной контроль, что позволило исключить брак на окончательном этапе сборки керамического корпуса и металлического каркаса.

Дополнительным преимуществом использования ПАУКа стала возможность реализации металлических каркасов, сохраненных в результате применения других инноваций, для использования в рамках вновь заключенных договоров. Условная производственно-экономическая эффективность от исключения технологических потерь из-за отклонений геометрических параметров металлических каркасов, а также внедрения поштучного учета и реализации сохраненных комплектующих за период с 2018 по 2023 годы могла достигать от 4 до 7 млн руб. ежегодно.

Заключение

Таким образом, проведенное исследование позволяет резюмировать следующие выводы.

Проведенная оценка демонстрирует значительную условную производственно-экономическую эффективность технологических инноваций, внедренных в наукоемкое производство керамических изделий на АО «ОИПП „Технология” им. А.Г. Ромашина».

Применение инновационного подхода позволило существенно снизить уровень технологических потерь, повысить качество и надежность выпускаемой продукции, оптимизировать использование ресурсов и обеспечить стабильное выполнение договорных обязательств. Особую ценность представляет комплексный подход к решению производственных задач, сочетающий технологические инновации с организационными и управленческими решениями. Внедрение рассмотренных новшеств позволило достичь значительного повышения эффективности производства наукоемких керамических изделий, а новизна этих решений подтверждается получением шести патентов РФ на изобретения.

Важно отметить, что внедренные технологические инновации не потребовали значительных финансовых затрат, но при этом обеспечили значительное повышение качества и надежности выпускаемой продукции, что подтверждено представленной оценкой условного производственно-экономического эффекта. Такие положительные результаты свидетельствуют о высокой рентабельности инновационных проектов, что особенно актуально в условиях ограниченных финансовых ресурсов многих наукоемких предприятий отрасли машиностроения.

Список источников

1. Миндлин Ю.Б. Настоящее и будущее развития наукоемкого производства Российской Федерации // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Экономика и право. 2021. № 3. С. 35-40.
2. Шинкевич А.И., Барсегян Н.В. Особенности инновационного развития высокотехнологичных секторов в России // Интеллектуальный город: устойчивость, управление, архитектура, реновация, технологии: сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. Казань: КГАСУ, 2018. С. 60-64.
3. Кудрявцева С.С., Халиулин Р.А. Процессный подход в управлении промышленным предприятием: инструменты индустрии 4.0 // Компетентность. 2022. № 6. С. 36-41.
4. Бережливое производство как адаптационный инструмент ценностного проектного управления экономическим развитием: теория и практика / Дзензелюк Н.С., Баев Л.А., Камалова А.С., Короленко А.Н., Новосад В.М. // Управление риском. 2024. № 4 (112). С. 28-41.
5. Пытьев Н.Н. Бережливое производство: контринтуитивные подходы к повышению операционной эффективности // Лидерство и менеджмент. 2025. Т. 12. № 5. С. 1091-1108.
6. Оптический контроль повреждений грузоподъемных канатов металлургического технологического оборудования / Кульчицкий А.А., Николаев М.Ю., Бригаднов И.А., Русинов Л.А. // Инженерный вестник Дона. 2025. № 3 (123). С. 133-153.
7. Рубцов Ю.В., Мальшев В.Э., Назаренко А.А. Автоматизированный визуальный контроль качества изделий микроэлектроники методом сравнения шаблонов // Радиотехническая электроника: проблемы и их решения. 2024. № 13. С. 18-21.
8. Патент № 2746674 С1 Российская Федерация, МПК G01N 21/93, G01N 21/952, G01N 21/954. Способ визуально-оптического контроля поверхности : № 2020128097 : заявл. 24.08.2020 : опубл. 19.04.2021 / Д. В. Харитонов, А. В. Терехин, А. И. Амосов [и др.] ; заявитель Акционерное общество «Обнинское научно-производственное предприятие „Технология” им. А.Г. Ромашина».
9. Ахмад А., Ляпунцова Е.В. Визуальный контроль в программно-техническом комплексе для автоматизации встроенных микропроцессорных систем // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 9. С. 179-184.
10. Патент РФ № 2699330. Программно-аппаратный управленческий комплекс, интегрированный в производство керамических изделий / Д.В. Харитонов, А.В. Грошев, А.А. Анашкина, М.Ю. Русин, А.С. Хамниев: опубл. 06.01.2018; заявитель Акционерное общество «Обнинское научно-производственное предприятие „Технология” им. А.Г. Ромашина».

References

1. Mindlin Yu.B. The present and future of the development of science-intensive production in the Russian Federation. *Sovremennaya nauka: aktualnye problemy teorii i praktiki. Seriya: Ekonomika i pravo* [Modern Science: Current issues of theory and practice. Series: Economics and Law]. 2021;(3):35-40. (In Russ.)
2. Shinkevich A.I., Barsegyan N.V. Features of innovative development of high-tech sectors in Russia. *Intellektualniy gorod: ustoychivost, upravlenie, arkhitektura, renovatsiya, tekhnologii: Sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Intelligent City: Sustainability, Management, Architecture, Renovation, Technologies. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference]. Kazan: KGASU, 2018;60-64. (In Russ.)
3. Kudryavtseva S.S., Khaliulin R.A. Process approach in industrial enterprise management: tools of Industry 4.0. *Kompetentnost* [Competency]. 2022;(6):36-41. (In Russ.)
4. Dzenzelyuk N.S., Baev L.A., Kamalova A.S., Korolenko A.N., Novosad V.M. Lean production as an adaptation tool for value-based project management of economic development: theory and practice. *Upravlenie riskom* [Risk Management]. 2024;(4(112)):28-41. (In Russ.)
5. Pytev N.N. Lean production: counterintuitive approaches to improving operational efficiency. *Liderstvo i menedzhment* [Leadership and Management]. 2025;12(5):1091-1108. (In Russ.)
6. Kulchitskiy A.A., Nikolaev M.Yu., Brigadnov I.A., Rusinov L.A. Optical inspection of damage to load-bearing ropes in metallurgical process equipment. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don]. 2025; (3(123)):133-153. (In Russ.)
7. Rubtsov Yu.V., Malyshev V.E., Nazarenko A.A. Automated visual quality control of microelectronics products using template matching. *Radioelektronnaya otrasl: problema i ikh resheniya* [Radioelectronic Industry: Problems and Their Solutions]. 2024;(13):18-21. (In Russ.)
8. Kharitonov D.V., Terexhin A.V., Amosov A.I. et al. *Sposob vizualno-opticheskogo kontrolya poverkhnosti* [Method of visual-optical surface inspection]. Patent RU, no. 2746674, C1, 2021.

9. Ahmad A., Lyapunsova E.V. Visual inspection in a software and hardware complex for automating embedded microprocessor systems. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Technical Sciences]. 2024;(9):179-184. (In Russ.).
10. Kharitonov D.V., Groshev A.V., Anashkina A.A., Rusin M.Yu., Khamniev A.S. *Programmo-apparatniy upravlencheskiy kompleks, integrirovanniy v proizvodstvo keramicheskikh izdeliy* [Software and hardware management complex integrated into ceramic products production]. Patent RU, no. 2699330, 2018.

Поступила 18.08.2025; принята к публикации 10.11.2025; опубликована 31.03.2026
Submitted 18/08/2025; revised 10/11/2025; published 31/03/2026

Амосов Алексей Игоревич – аспирант,
Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия;
начальник участка,
АО «ОНПП „Технология” им. А. Г. Ромашина», Обнинск, Россия.
Email: tech.amosov@obninsk.ru. ORCID 0009-0004-7613-6999

Кудрявцева Светлана Сергеевна – доктор экономических наук, доцент,
Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия.
Email: sveta516@yandex.ru. ORCID 0000-0002-2467-8874

Харитонов Дмитрий Викторович – доктор технических наук, доцент,
заслуженный изобретатель Российской Федерации, заместитель директора научно-производственного комплекса по производственной деятельности – начальник цеха,
АО «ОНПП „Технология” им. А. Г. Ромашина», Обнинск, Россия.
Email: haritonovdv1978@gmail.com. ORCID 0000-0002-5121-6448

Alexey I. Amosov – Postgraduate Student,
Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia;
Head of Workshop Section,
JSC ONPP Tekhnology named after A. G. Romashin, Obninsk, Russia.
Email: tech.amosov@obninsk.ru. ORCID 0009-0004-7613-6999

Svetlana S. Kudryavtseva – DrSc (Eng.), Associate Professor,
Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia.
Email: sveta516@yandex.ru. ORCID 0000-0002-2467-8874

Dmitry V. Kharitonov – DrSc (Eng.), Associate Professor, Honored Inventor of the Russian Federation,
Deputy Director of the Scientific and Production Complex for Production Activities – Head of the Workshop,
JSC ONPP Tekhnology named after A. G. Romashin, Obninsk, Russia.
Email: haritonovdv1978@gmail.com. ORCID 0000-0002-5121-6448