

ВЕСТНИК

Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова

2023. Т.21, №4

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. Журнал индексируется в международных и российских базах данных: Ulrich's Periodicals Directory, Crossref, Google Scholar, RSCI, ядро РИНЦ, ВИНТИ и др. Электронные версии журнала размещаются на сетевом ресурсе Научной Электронной Библиотеки в сети Интернет.

Издается с марта 2003 года

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Председатель редакционной коллегии
В.М. Колокольников (Россия)

Ж.-Б. Вогт (Франция), С.Е. Гавришев (Россия),
В.Е. Громов (Россия), Я. Грум (Словения),
И.Г. Гун (Россия), М. Дабала (Италия),
Х. Дыя (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), В.М. Счастливцев (Россия),
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 А.А. Нерода
Перевод на английский О.Е. Сухих
Дизайн обложки: А.Д. Григорьев

© ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2023

Подписной индекс издания 48603 в объединенном каталоге «Пресса России», том 1.

Также подписку в оперативном режиме можно оформить и оплатить в удобной для Вас форме на подписной страничке сайта Агентства «Книга-Сервис» по ссылке:

код html: <http://www.akc.ru/itm/vestnik-magnitogorskogo-gosudarstvennogo-tehnicheskogo-universiteta-im-gi-nosova/>

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 25.12.2023. Заказ 400. Тираж 500 экз. Цена свободная.

VESTNIK

of Nosov Magnitogorsk State Technical University

2023. Vol.21, no.4

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. 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)

M. Dabala' (Italy), R.O. Dusane (India),
H. Dyja (Poland), Ye Feng (China),
S.E. Gavrishev (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),
V.M. Schastlivtsev (Russia), 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 A.A. Neroda

Translated into English O.E. Sukhikh

The cover is designed by A.D. Grigorev

© Federal State Budgetary Institution of Higher Education
Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2023

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_mgtu@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: 25.12.2023. Order 400. Circulation: 500. Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ 5

Чебан А.Ю.

Повышение эффективности разработки
сложноструктурных пластовых месторождений
за счет применения модернизированных
карьерных комбайнов 5

**Ческидов В.И., Гаврилов В.Л.,
Резник А.В., Немова Н.А.**

Условия и опыт формирования промышленных
комплексов на базе угольных месторождений
восточных регионов России 13

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО 23

**Андреев С.М., Колокольцев М.В., Савинов Д.А.,
Дубровин В.К., Петроченко Е.В.**

Использование искусственных нейронных сетей
для прогнозирования прочностных свойств
песчано-глинистых смесей литейных форм 23

ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ .. 34

**Груба О.Н., Ардашев Д.В.,
Дегтярева-Кащутина А.С.**

Исследование физико-химических свойств
электролитов для хромирования титановых деталей 34

Мальков О.В., Карельский А.С.

Теоретический расчет составляющих силы резания
при резьбофрезеровании 44

**Терентьев Д.В., Байгузин М.Р., Платов С.И.,
Звягина Е.Ю., Тютяряков Н.Ш.**

Математическое моделирование процесса резания
листового металла параллельными ножами 56

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ 63

**Алексеев Д.Ю., Емалеева Д.Г., Кузнецова А.С.,
Гулин А.Е., Адисhev П.Г., Тетюшин К.П.**

Выбор схемы ускоренного охлаждения рулонного
проката из низколегированной стали на основе
конечно-элементного моделирования 63

**Сычков А.Б., Нестеренко А.М., Завалищин А.Н.,
Моллер А.Б., Кулаков Б.А., Шубин И.Г.**

Формирование микроструктуры и механических
свойств арматурного проката в бунтах из двух-
и мультифазной стали 70

НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ 81

**Щегольков А.В., Щегольков А.В., Земцова Н.В.,
Комаров Ф.Ф., Парфимович И.Д.**

Влияние микроразмерных металлических
наполнителей на тепло- и электрофизические
свойства наномодифицированных эластомеров 81

СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ 93

**Рябчиков М.Ю., Рябчикова Е.С., Чута А.С.,
Васильева Е.И., Емельяшин А.Н.**

Влияние скорости движения и натяжения стальной
полосы на дефекты продукции агрегатов
непрерывного горячего оцинкования 93

CONTENTS

MINING 5

Cheban A.Yu.

Increasing the Efficiency of Mining
of Complex-Structured Bedded
Deposits by Using Modernized
Surface Miners 5

**Cheskidov V.I., Gavrilov V.L.,
Reznik A.V., Nemova N.A.**

Conditions and Experience of Establishing
Industrial Complexes at Coal Deposits
in the Eastern Regions of Russia 13

FOUNDRY ENGINEERING 23

**Andreev S.M., Kolokoltsev M.V., Savinov D.A.,
Dubrovin V.K., Petrochenko E.V.**

The Usage of Artificial Neural Networks
for Predicting Strength Properties of Sand-Clay
Mixtures for Casting Molds 23

MATERIAL PROCESS ENGINEERING 34

**Gruba O.N., Ardashev D.V.,
Degtyareva-Kashutina A.S.**

Physical and Chemical Properties of Electrolytes
for Chromium Plating of Titanium Parts 34

Malkov O.V., Karelskiy A.S.

Theoretical Calculation of the Components
of Thread Milling Cutting Forces 44

**Terentyev D.V., Baiguzin M.R., Platon S.I.,
Zvyagina E.Yu., Tyuteryakov N.Sh.**

Mathematical Modeling of the Process of Cutting
Sheet Metal with Parallel Knives 56

MATERIALS SCIENCE AND HEAT TREATMENT OF METALS 63

**Alekseev D.Yu., Emaleeva D.G., Kuznetsova A.S.,
Gulin A.E., Adishchev P.G., Tetyushin K.P.**

Selecting an Accelerated Cooling Schedule
for Low-Alloy Steel Coils Based
on Finite Element Modeling 63

**Sychkov A.B., Nesterenko A.M., Zavalishchin A.N.,
Moller A.B., Kulakov B.A., Shubin I.G.**

Formation of a Microstructure and Mechanical
Properties of Dual- and Multi-Phase Reinforcing
Steel in Coils 70

NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES 81

**Shchegolkov A.V., Shchegolkov A.V., Zemtsova N.V.,
Komarov F.F., Parfimovich I.D.**

Influence of Microsized Metal Fillers on Thermal
and Electrophysical Properties of Nanomodified
Elastomers 81

STANDARDIZATION, CERTIFICATION AND QUALITY MANAGEMENT 93

**Ryabchikov M.Yu., Ryabchikova E.S., Chuta A.S.,
Vasilyeva E.I., Emelyushin A.N.**

Influence of Steel Strip Speed and Tension
on Product Defects on Continuous Hot-Dip
Galvanizing Lines 93

Запорожцев А. В., Хазова Вер. И., Хазова Вик. И.
Ключевые аспекты создания цифрового двойника
процесса системы менеджмента качества 105

**Извеков Ю.А., Рамазанов К.Н., Гончарова Е.А.,
Каримова Д.Ф., Шубин И.Г., Смирнова Л.В.**
Управление качеством эксплуатации
металлургических кранов на основе метода
псевдосостояний 117

Мусабирова Л.А., Галимов Ф.М.
Апробация метода «SERVQUAL» при оценке
качества услуг в области обеспечения единства
измерений 124

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ 132

**Пивоварова К.Г., Матвеев С.В., Песина С.А.,
Могильных А.Е., Пустовойтова О.В., Федосеев С.А.**
Моделирование процесса изгиба
сталеалюминиевого композита с волнообразной
границей раздела 132

**Федулов А.А., Беляев С.Ю.,
Булганина М.Ю., Раскатов Е.Ю.**
Моделирование процесса обкатки дефектных
концов горячедеформированных труб
при производстве на установках
с автоматическим станом 140

**Бодров Е.Г., Серебряков И.С., Латфулина Ю.С.,
Напримерова Е.Д., Мясоедов В.А., Самодурова М.Н.**
Математическое моделирование процесса холодного
газодинамического напыления порошковых
цветных металлов 148

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ 157

**Маслов Д.А., Овсянников В.Е.,
Кулемина А.А., Ковенский И.М.**
Повышение эффективности изготовления
монокристаллического режущего инструмента в условиях
мелких серий на основе экспресс-испытаний 157

Сергеев Ю.С., Платов С.И., Гузев В.И., Сергеев С.В.
Применение виброприводов с модулирующими
свойствами в дробилках хрупких материалов
для управления фракционным составом
дисперсной фазы 164

ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И РЫНОК ПРОДУКЦИИ 176

Прыткова Е.А., Давыдов В.М.
Особенности реинжиниринга технологических
процессов на промышленных предприятиях 176

Zaporozhtsev A.V., Khazova Ver.I., Khazova Vik.I.
Key Aspects of Creating a Digital Twin
of the Quality Management System Process 105

**Izvekov Yu.A., Ramazanov K.N., Goncharova E.A.,
Karimova D.F., Shubin I.G., Smirnova L.V.**
Quality Management of Operation
of Metallurgical Cranes Based on a Method
of Pseudostates 117

Musabirova L.A., Galimov F.M.
Evaluating the SERVQUAL Method in Assessing
the Quality of Services in the Field of Ensuring
Uniformity of Measurements 124

MODELLING OF METALLURGICAL PROCESSES 132

**Pivovarova K.G., Matveev S.V., Pesina S.A.,
Mogilnykh A.E., Pustovoitova O.V., Fedoseev S.A.**
Simulation of the Bending Process
of a Steel-Aluminum Composite
with a Wave-Shaped Interface 132

**Fedulov A.A., Belyaev S.Yu.,
Bulganina M.Yu., Raskatov E.Yu.**
Simulation of a Burnishing Process
for Defective Ends of Hot-Deformed Tubes,
when Producing Them on Facilities
with an Automatic Rolling Mill 140

**Bodrov E.G., Serebriakov I.S., Latfulina Yu.S.,
Naprimerova E.D., Myasoedov V.A., Samodurova M.N.**
Mathematical Modeling of the Process
of Cold Gas Dynamic Spraying
of Powder Non-Ferrous Metals 148

NEW TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT 157

**Maslov D.A., Ovsyannikov V.E.,
Kulemina A.A., Kovensky I.M.**
Increased Efficiency of Manufacturing
Monolithic Cutting Tools in Small Batches
Based on Express Tests 157

Sergeev Yu.S., Platov S.I., Guzev V.I., Sergeev S.V.
Application of Vibration Drives with Modulating
Properties in Crushers of Brittle Materials
to Control the Fractional Composition
of the Dispersed Phase 164

ECONOMICS, MANAGEMENT AND PRODUCT MARKET 176

Prytkova E.A., Davydov V.M.
Features of Reengineering of Technological Processes
at Industrial Enterprises 176

РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ MINING

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

УДК 622.271

DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-4-5-12



ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТКИ СЛОЖНОСТРУКТУРНЫХ ПЛАСТОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ МОДЕРНИЗИРОВАННЫХ КАРЬЕРНЫХ КОМБАЙНОВ

Чебан А.Ю.

Институт горного дела Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения
Российской академии наук, Хабаровск, Россия

Аннотация. Актуальность исследования. Пластовые месторождения полезных ископаемых, в частности угля, горючих сланцев, фосфоритов, преимущественно имеют сложную структуру с наличием в продуктивных пластах прослоев пустых пород или некондиционных включений. Разработка сложноструктурных месторождений без обеспечения необходимого уровня селекции при выемке приводит к существенным потерям полезного ископаемого и его разубоживанию. Повысить качество селективной выемки при разработке сложноструктурных пластовых месторождений позволяют технологии с применением карьерных комбайнов, однако наличие в ряде случаев в пласте прослоев прочных горных пород ограничивает возможность использования карьерных комбайнов и делает их работу малопродуктивной. **Цель работы.** Совершенствование технологии послойной отработки сложноструктурных пластов за счет применения модернизированного карьерного комбайна, обеспечивающего повышение эффективности рыхления прочных породных прослоев посредством их предварительной дезинтеграции с применением раствора поверхностно-активных веществ. **Результаты.** В статье предлагается технико-технологическое решение по разработке сложноструктурных пластов, сложенных породами, значительно различающимися по прочности, с применением карьерного комбайна, снабженного оборудованием для дезинтеграции прочных породных прослоев небольшой мощности путем формирования щелей с одновременной подачей в них раствора поверхностно-активных веществ. Модернизированный карьерный комбайн для обеспечения рациональных режимов рыхления полезного ископаемого и прочных породных прослоев снабжен фрезерным рабочим органом с изменяемой схемой расстановки резцов. **Практическая значимость.** Предлагаемое технико-технологическое решение может быть использовано при разработке сложноструктурных угольных пластов и позволит существенно повысить производительность карьерного комбайна при выемке прочных породных прослоев за счет их предварительной дезинтеграции, что обеспечит снижение себестоимости работ и позволит повысить рентабельность горного производства.

Ключевые слова: сложноструктурный пласт, прочный породный прослой, карьерный комбайн, производительность рыхления, фрезерный рабочий орган, формирование щелей, дезинтеграция

© Чебан А.Ю., 2023

Для цитирования

Чебан А.Ю. Повышение эффективности разработки сложноструктурных пластовых месторождений за счет применения модернизированных карьерных комбайнов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №4. С. 5-12. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-5-12>



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

INCREASING THE EFFICIENCY OF MINING OF COMPLEX-STRUCTURED BEDDED DEPOSITS BY USING MODERNIZED SURFACE MINERS

Cheban A.Yu.

Mining Institute of the Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia

Abstract. Relevance. Bedded deposits of minerals, in particular coal, oil shale, phosphorites, predominantly have a complex structure with interlayers of waste rocks or substandard inclusions in producing beds. Complex-structured deposit mining without providing the required level of selection during extraction leads to significant losses of minerals and their dilution. To improve the quality of selective extraction in complex-structured bedded deposit mining, mining companies involve technologies using surface miners; however, in some cases, layers of strong rocks in the bed limits the possibility of using surface miners and makes their operation low-yielding. **Objective.** Improving the technology of layer-by-layer mining of complex-structured beds by using a modernized surface miner, ensuring an increase in the efficiency of loosening strong rock layers by their preliminary disintegration using a solution of surfactants. **Results.** The paper proposes a technical and technological solution to mining of complex-structured beds composed of rocks that significantly differ in strength, using a surface miner with equipment for the disintegration of strong rock interlayers of small thickness by forming cracks and delivering into them a solution of surfactants. The upgraded surface miner is equipped with a milling working body with a variable arrangement of cutters to ensure reasonable modes of loosening minerals and strong rock interlayers. **Practical Relevance.** The proposed technical and technological solution may be used in mining of complex-structured coal beds. This will significantly increase performance of surface miners when extracting strong rock interlayers due to their preliminary disintegration, resulting in lower cost of operation and higher profitability of mining.

Keywords: complex-structured bed, strong rock interlayer, surface miner, loosening performance, milling working body, formation of cracks, disintegration

For citation

Cheban A.Yu. Increasing the Efficiency of Mining of Complex-Structured Bedded Deposits by Using Modernized Surface Miners. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 4, pp. 5-12. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-5-12>

Введение

Важным направлением развития горной науки и производства является создание технологий, основанных на обеспечении принципов малоотходности и ресурсосбережения, позволяющих увеличить извлечение полезного ископаемого из недр и повысить эффективность его последующей переработки [1-7]. При разработке пластовых месторождений, характеризующихся сложной структурой, когда пласты полезного ископаемого перемежаются пустыми породами, а их мощность варьирует в широких пределах, очень важно обеспечить необходимую глубину селекции для сохранения природного качества полезного ископаемого. Применение традиционных технологий, включающих взрывное рыхление массива с последующей выемкой подготовленной горной массы крупными одноковшовыми экскаваторами и погрузчиками ведет к существенным потерям полезного ископаемого и его разубоживанию [8-10]. Так, с учетом технических параметров карьерно-

го оборудования, задействованного на угольных разрезах Дальнего Востока, минимальная мощность селективно извлекаемого угольного пласта составляет 1-2 м, а максимальная мощность внутрипластовых породных прослоев, включаемая в подсчет запасов, достигает 0,7-1 м, таким образом, маломощные пласты угля вместе с пустыми породами отправляются в отвал, а прослой пустых пород извлекаются совместно с углем, существенно снижая его качество [8]. Повысить глубину селективной выемки позволяют технологические схемы, предусматривающие безвзрывное рыхление сложноструктурных массивов с применением бульдозерно-рыхлительных агрегатов, карьерных комбайнов, фрезерных машин и другого оборудования.

Состояние вопроса и постановка проблемы

Карьерные комбайны активно применяются для разработки месторождений угля, известняков, апатитов, фосфоритов и других полезных ископаемых [11, 12]. По сравнению с традиционными технологиями, включаю-

щими буровзрывное рыхление массива и выемку взорванной массы одноковшовыми экскаваторами или погрузчиками, технология механической выемки с применением карьерных комбайнов обеспечивает упрощение технологического процесса, уменьшение номенклатуры карьерного оборудования (поскольку рыхление, выемка, погрузка и крупное дробление производится одной машиной), обеспечение селективной выемки тонких пластов полезного ископаемого мощностью до 0,2 м и менее, высокую производительность при работе с плотными и легко разрабатываемыми полускальными породами [13, 14]. Недостатком карьерных комбайнов является значительное снижение производительности при увеличении прочности горных пород [14, 15], что ведет к росту себестоимости выемки и делает технологию с применением буровзрывного рыхления экономически более предпочтительной. Кроме того, при разработке прочных пород на рабочий орган, трансмиссию и металлоконструкцию комбайна действуют повышенные динамические нагрузки, которые могут привести к поломке оборудования.

В горном производстве используются карьерные комбайны различных производителей Krupp, MAN Takraf, Voest-Alpin, Rahco, имеются отдельные образцы карьерных комбайнов отечественного производства, но наибольшее распространение получили комбайны фирмы Wirtgen [16-19]. В результате анализа научно-технической литературы автором получены зависимости технической производительности карьерных комбайнов фирмы Wirtgen различных типоразмеров от прочности разрабатываемых горных пород (рис. 1).

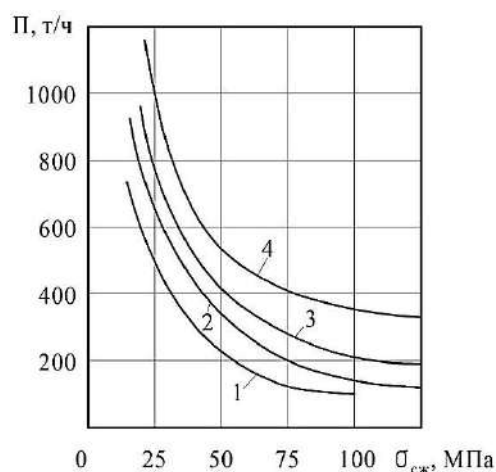


Рис. 1. Зависимости технической производительности комбайнов от прочности горных пород на сжатие: 1 – комбайн Wirtgen 2100SM; 2 – комбайн Wirtgen 2600SM; 3 – комбайн Wirtgen 2200SM; 4 – комбайн Wirtgen 2500SM

Fig. 1. Dependences between technical performance of surface miners and compressive strength of rocks: 1 is Wirtgen 2100SM; 2 is Wirtgen 2600SM; 3 is Wirtgen 2200SM; 4 is Wirtgen 2500SM

Особенно большой эффект от применения карьерных комбайнов наблюдается при разработке сложноструктурных пластов, при этом обеспечивается повышение коэффициента извлечения полезного ископаемого из недр, а также улучшение его качества за счет снижения разубоживания пустыми породами [17]. В сложноструктурных пластах полезное ископаемое перемежается с породными прослоями, которые преимущественно имеют прочность, существенно большую, чем полезное ископаемое. Так, на карьере Кивиоли (Эстония) пласты горючих сланцев прочностью 2-4 единицы по шкале М.М. Протодяконова чередуются с прослоями известняка прочностью 5-10 единиц [20]. На Восточно-Бейском разрезе (Хакасия) пласты каменного угля прочностью 1,5-2 единицы по шкале М.М. Протодяконова имеют в своем составе прослойки пустых пород с прочностью от 3 до 8 единиц, на Талдинском разрезе (Кемеровская область) прочность породных прослоев на сжатие составляет 50-100 МПа, что многократно превышает прочность каменного угля, на Эльгинском каменноугольном месторождении (Якутия) прочность породных прослоев меньше и обычно не превышает 48-55 МПа, однако также существенно выше прочности угля, в связи с чем производительность выемочной техники при разработке угля и породных прослоев значительно различается [13, 21]. Проведенные в работе [13] расчеты показали, что производительность карьерного комбайна Wirtgen 4200SM, задействованного на разработке сложноструктурного угольного пласта Эльгинского месторождения, при выемке угля будет составлять 2030 т/ч, а при выемке породных прослоев – 763 т/ч. На карьере Кивиоли скорость движения комбайна Wirtgen 2500SM (при равной мощности фрезеруемого слоя) в процессе выемки горючих сланцев была в 2-3 раза выше, чем при выемке прослоев известняка [20].

Повысить производительность рыхления прочных пород возможно путем их предварительной дезинтеграции (разупрочнения) с применением растворов поверхностно-активных веществ (ПАВ) [21-23]. Так, при пропитке массива на Талдинском угольном месторождении раствором ПАВ через сеть скважин 1,3×1,3 м в течение двух суток удалось снизить прочность на сжатие мелкозернистых песчаников с 93 до 60 МПа, а алевролитов и аргиллитов – с 90 до 70 МПа [21]. Лабораторные исследования по дезинтеграции образцов прочных пород Эльгинского угольного месторождения растворами ПАВ показали возможность снижения их прочности на 30-50% [22]. Технология, предлагаемая в работе [21], с бурением сети скважин трудоемка и затратна для разупрочнения прочных породных прослоев малой мощности.

При добыче угля важное значение имеет его фракционный состав, поскольку наличие большого количества мелких фракций (<13 мм) снижает его рыночную стоимость, ведет к увеличению потерь от просыпания и выдувания при погрузке и транспортировке, кроме то-

го, в ряде случаев сжигание угля, содержащего большое количество мелочи, приводит к снижению коэффициента полезного действия топочных устройств, уменьшает эффективность и экологическую безопасность использования топлива [24]. Для снижения выхода мелких классов при добыче угля на карьерные комбайны устанавливаются так называемые «угольные» рабочие органы с удлиненными резцами и увеличенным расстоянием между ними [17, 25]. Такие рабочие органы обеспечивают высокую производительность выемки, однако предназначены для использования исключительно в «легких» условиях работы и не могут использоваться для выемки прочных породных прослоев. В то же время на сложноструктурных угольных месторождениях происходит постоянное чередование слоев угля и пустых пород. Так, на Эльгинском месторождении, содержащем ценные марки коксующихся и энергетических углей, запасы, предназначенные для отработки открытым способом, содержатся в 22-х пластах, большинство из которых имеют сложное строение и включают от 1-2 до 10-12 породных прослоев, преимущественно мощностью до 0,5 м. Например, угольный пласт Н₁₅, условно разделенный на шесть участков, содержит 1802 породных прослоя мощностью 0,05-0,20 м, 283 прослоя мощностью 0,20-0,50 м и 44 прослоя мощностью более 0,5 м, в общем на долю породных прослоев приходится 13,7% объема пласта [13, 17].

Для отработки сложноструктурных угольных пластов без замены исполнительного оборудования комбайна при выемке угля и породных прослоев в работе [17] предлагается конструкция фрезерного рабочего органа карьерного комбайна, оснащенного комбинированным режущим инструментом, включающим удлиненные резцы для рыхления угля и стандартные резцы для рыхления более прочных пород. С помощью привода, размещенного внутри корпуса рабочего органа, резцы могут поворачиваться в положение для отработки угля или прочных пород. Недостатком технологии является невысокая производительность выемки прочных породных прослоев, а также относительно высокие нагрузки на конструкцию фрезерного рабочего органа со стороны прочных пород, что снижает долговечность оборудования и может привести к его поломке.

Целью работы является совершенствование технологии послойной отработки сложноструктурных пластов за счет применения модернизированного карьерного комбайна, обеспечивающего повышение эффективности рыхления прочных породных прослоев посредством их предварительной дезинтеграции с применением раствора поверхностно-активных веществ.

Результаты исследования

Институтом горного дела ДВО РАН предлагается технико-технологическое решение по разработке сложноструктурных пластов, сложенных породами, значительно различающихся по прочности, с приме-

нением модернизированного карьерного комбайна (рис. 2), оснащенного фрезерным рабочим органом 1 с изменяемой схемой расстановки резцов 2, 3, приемным транспортером 4 и разгрузочным конвейером 5 на поворотной консоли 6, а также оборудованием для дезинтеграции прослоев 7 прочных пород. Оборудование для дезинтеграции прослоев 7 включает раму 8, на которой установлены привод 9, вал с нарезными дисками 10, трубопроводы с насадками 11 для подачи раствора ПАВ из цистерны 12 (рис. 2, а). Рама 8 шарнирно прикреплена к металлоконструкции карьерного комбайна и может поворачиваться посредством гидроцилиндров 13.

При разработке сложноструктурного угольного пласта модернизированный карьерный комбайн может одновременно выполнять рыхление и погрузку угля, а также подготовку прочных пород прослоя 7 к выемке. Рыхление угля осуществляется фрезерным рабочим органом 1, на котором посредством привода в рабочее положение повернуты удлиненные резцы 2 с увеличенным шагом расстановки (рис. 2, в), с целью снижения выхода мелких фракций (подробное описание конструкции фрезерного рабочего органа с изменяемой расстановкой резцов приведено в работе [17]). Разрыхленный уголь подается на приемный транспортер 4, далее на разгрузочный конвейер 5 и в автосамосвал (на рис. 2 не показан). После выемки угля из верхней части 14 сложноструктурного пласта обнажается прослой 7, для осуществления его дезинтеграции гидроцилиндрами 13 опускается рама 8, нарезными дисками 10 ведется формирование щелей 15 на ширину обрабатываемой фрезерным рабочим органом полосы 16, в щели 15 через насадки 11 подается раствор ПАВ (рис. 2, а, б). После прохода модернизированного карьерного комбайна до конца полосы 16 осуществляется его разворот с отработкой смежной полосы на рабочей площадке и выполнением ранее описанной последовательности операций.

Пропитка прослоя раствором ПАВ осуществляется в течение двух-трех суток, молекулы ПАВ адсорбируются на поверхности разрушаемой породы, снижая поверхностную энергию и оказывая влияние на ее механические характеристики, это, согласно данным исследований [21, 22], позволит снизить прочность прослоя на 30-40%. Несмотря на существенное снижение прочности пород дезинтегрированного прослоя 17, они по-прежнему будут значительно прочнее угля, в связи с чем для рыхления необходимо использовать стандартные резцы 3. В связи с этим перед выемкой дезинтегрированного прослоя 17 в рабочее положение поворачиваются стандартные резцы 3 фрезерного рабочего органа 1 с обычным шагом расстановки (рис. 2, г). При этом рама 8 с нарезными дисками 10 находится в поднятом состоянии и оборудование для дезинтеграции прослоев прочных пород в работе не задействовано.

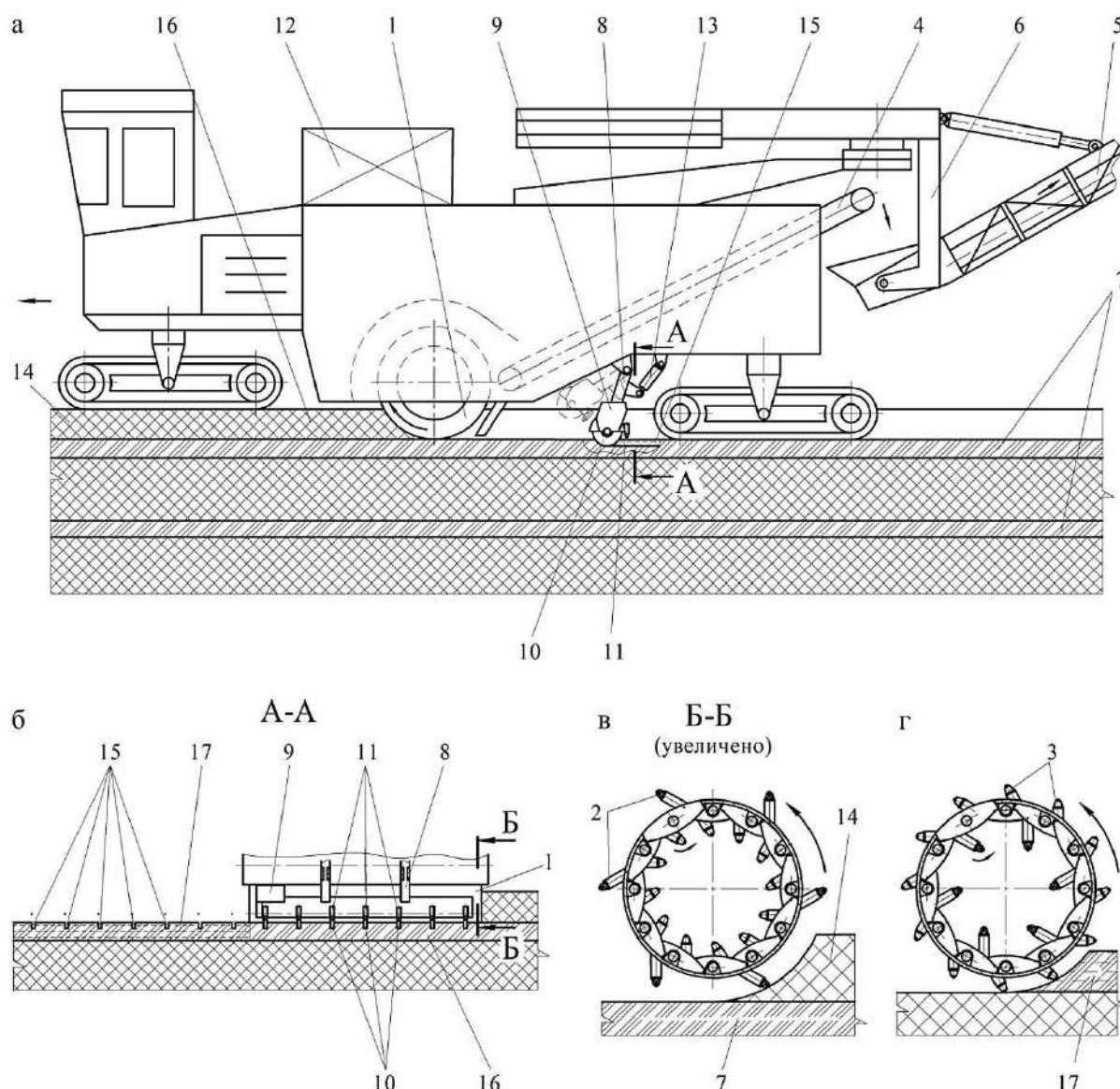


Рис. 2. Схема послойной разработки сложноструктурного пласта модернизированным карьерным комбайном с дезинтеграцией прослоев прочных пород: а – общий вид комбайна; б – формирование щелей в прослое; в, г – фрезерный рабочий орган с резцами в положении для разработки угля и дезинтегрированного прослоя соответственно

Fig. 2. Scheme of a layer-by-layer mining of a complex-structured bed by a modernized surface miner with disintegration of interlayers of strong rocks: а is a general view of the surface miner; б is formation of cracks in the interlayer; в, г is a milling working body with cutters in the position for mining of coal and the disintegrated interlayer, respectively

После выемки дезинтегрированного прослоя 17 прочных пород в рабочее положение вновь устанавливаются удлиненные резцы 2 фрезерного рабочего органа 1 и осуществляется выемка угля из нижележащей части сложноструктурного пласта.

По сравнению с бурением сети скважин для заливки раствора ПАВ формирование щелей 15 посредством нарезных дисков 10 более технологично для разупрочнения прослоев 7 прочных пород небольшой мощности и не требует применения дополнительного горного

оборудования. Ближее расстояние между смежными щелями 15 позволит повысить скорость дезинтеграции прослоя. Глубина щелей 15 для заливки необходимого объема раствора ПАВ определяется по формуле

$$h = \frac{H \cdot B \cdot V \cdot k}{s \cdot n},$$

где H – мощность прослоя, м; B – ширина отрабатываемой полосы, м; V – удельный расход раствора

ПАВ на пропитку массива, $\text{м}^3/\text{м}^3$; k – коэффициент, учитывающий частичное поглощение раствора ПАВ непосредственно при заливке из-за наличия трещиноватости и пористости массива; s – ширина формируемой щели, м; n – число щелей.

Расчеты показывают, что при разработке сложноструктурного пласта модернизированным карьерным комбайном с шириной фрезерования 2,6 м для дезинтеграции прослоя мощностью 0,25 м, при формировании семи щелей на отрабатываемой полосе с шириной щели 0,01 м и удельным расходом раствора ПАВ для пропитки массива – $0,005 \text{ м}^3/\text{м}^3$, при коэффициенте $k = 0,9$ необходимая глубина щелей составит порядка 4-5 см. Ограниченная подача раствора ПАВ через близко нарезанные друг от друга щели в локальном объеме прослоя с учетом его мощности обеспечивает поглощение раствора ПАВ прочными породами прослоя с минимальным просачиванием раствора в пласт полезного ископаемого.

Исходя из графиков, представленных на рис. 1, видно, что при снижении прочности пород прослоя с 90 МПа на 30-40% техническая производительность комбайнов существенно возрастет, в частности у карьерного комбайна Wirtgen 2600SM производительность увеличится в 1,5-1,8 раза.

Закключение

В статье предлагается технико-технологическое решение по разработке сложноструктурных пластов, сложенных породами, значительно различающимися по прочности, с применением модернизированного карьерного комбайна, снабженного оборудованием для дезинтеграции прочных породных прослоев небольшой мощности. Дезинтеграция прослоев осуществляется путем формирования щелей с одновременной подачей в них раствора ПАВ для пропитки прочных пород. Формирование щелей в сравнении с бурением сети скважин для подачи раствора ПАВ позволит существенно упростить и удешевить процесс подготовки к ведению дезинтеграции тонких прослоев, а также повысить его производительность. Предложена формула для определения необходимой глубины формируемых щелей, в которые подается раствор ПАВ.

Модernизированный карьерный комбайн снабжен фрезерным рабочим органом с изменяемой схемой расстановки резцов, при этом полезное ископаемое отрабатывается удлиненными редко расставленными резцами для обеспечения высокой производительности выемки. Перед отработкой дезинтегрированных породных прослоев, имеющих более высокую прочность в сравнении с полезным ископаемым, осуществляется поворот резцов с изменением схемы их расстановки и включением в работу стандартных резцов. Снижение прочности породного прослоя после его пропитки раствором ПАВ позволяет снизить нагрузки на рабочее оборудование и значительно повысить производительность карьерного комбайна, что обеспечит снижение себестоимости выемки и позволит повысить рентабельность горного производства.

Список источников

1. Трубецкой К.Н., Захаров В.Н., Галченко Ю.П. Природоподобные и конвергентные технологии при освоении минеральных ресурсов литосферы // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. №6. С. 560-566.
2. Afum B.O., Ben-Awuah E., Askari-Nasab H. A mixed integer linear programming framework for optimising the extraction strategy of open pit - underground mining options and transitions // International Journal Of Mining Reclamation And Environment. 2019, vol. 34, no. 10, pp.700-724.
3. LaRoche-Boisvert M., Dimitrakopoulos R. An Application of Simultaneous Stochastic Optimization at a Large Open-Pit Gold Mining Complex under Supply Uncertainty // Minerals 2021, vol. 11, no. 2, p. 172.
4. Sekisov A., Rasskazova A. Assessment of the possibility of hydrometallurgical processing of low-grade ores in the oxidation zone of the Malmyzh Cu-Au porphyry deposit // Minerals. 2021, vol. 11, no. 1, pp. 1-11.
5. Baninla Y., Zhang M., Lu Y., Liang R., Zhang Q., Zhou Yu., Khan K. A transitional perspective of global and regional mineral material flows // Resources, Conservation and Recycling. 2019, vol. 140, pp. 91-101.
6. Секисов А.Г., Шевченко Ю.С., Лавров А.Ю. Взрывоинжекционная подготовка руд к выщелачиванию // Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды: сб. науч. ст. Новосибирск, 2012. С. 125-132.
7. Sekisov G.V., Cheban A.Y. Low-waste mining technology for structurally complex deposits with mixed-type process flows of ore extraction and processing // Journal of Mining Science. 2021. Т. 57. № 6. С. 978-985.
8. Щадов В.М. Открытая разработка сложноструктурных угольных месторождений Восточной Сибири и Дальнего Востока. М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 2004. 298 с.
9. Азев В.А., Гартман А.А., Хажиев В.А. О технологических параметрах открытой угледобычи пологоспадающих месторождений при роботизации автомобильного транспорта // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №2. С. 5-12.
10. Чебан А.Ю. Совершенствование геотехнологии выемки тонких рудных тел с применением стрелового комбайна // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2020. №1. С. 340-348.
11. Mohd Im. Variation of production with time, cutting tool and fuel consumption of surface miner 2200 SM 3.8 // International Journal of Technical Research and Applications. 2016, no. 1, pp. 224-226.
12. Чебан А.Ю. Способ добычных работ для малых угольных разрезов с применением усовершенствованного карьерного комбайна // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. №2. С. 36-42.

13. Ермаков С.А., Иль А.П., Хосоев Д.В. Оценка эффективности применения комбайнов Wirtgen на Эльгинском каменноугольном месторождении // Горная промышленность. 2018. №6. С. 77-79.
14. Kumar C., Murthy V., Kumaraswamidhas L., Prakash A. Influence of cutting drum specifications on the production performance of surface miner under varied rock strength – some investigations // Journal of Mines, Metals and Fuels. 2016, vol. 64, pp. 181-186.
15. Чебан А.Ю. К вопросу об определении производительности карьерных комбайнов в различных условиях эксплуатации // Системы. Методы. Технологии. 2014. №3. С. 145-148.
16. Клементьева И.Н., Кузиев Д.А. Современное состояние и перспективы развития конструкций карьерных комбайнов для безвзрывной послойной выемки прочных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. №2. С. 123-128.
17. Улучшение качества минерального сырья при разработке сложноструктурных месторождений посредством модернизации рабочего оборудования карьерных комбайнов / А.Е. Бурдонов, А.Ю. Чебан, Н.П. Хрунина, К.В. Прохоров // Экология и промышленность России. 2017. Т. 21. №11. С. 4-9.
18. Palei S.K., Karmakar N.C., Paliwal P., Schimm B. Optimization of productivity with surface miner using conveyor loading and truck dispatch system // International Journal of Research in Engineering and Technology. 2013, vol. 2, no. 9, pp. 393-396.
19. Чебан А.Ю. Классификация конструкций карьерных комбайнов // Недропользование XXI век. 2015. №5. С. 64-69.
20. Пихлер М., Панкевич Ю.Б., Николаев Д.В. Первые результаты работы горного комбайна Wirtgen 2500SM на сланцевом карьере Kivioli (Эстония) // Горная промышленность. 2006. №3. С. 20-22.
21. Применение методов физико-химического разупрочнения массивов крепких пород при работе машин типа КСМ / А.Г. Кузнецов, Р.М. Штейнцайг, Г.Я. Воронков, А.И. Шендеров, А.А. Александров // Горная промышленность. 1997. №4. С. 3-7.
22. Панишев С.В., Хосоев Д.В., Матвеев А.И. Повышение эффективности разработки вскрышных пород и углей Эльгинского месторождения Якутии путем их разупрочнения с использованием поверхностно-активных веществ // Горная промышленность. 2021. №1. С. 98-104.
23. Чебан А.Ю., Секисов А.Г. Совершенствование технологии разработки сложноструктурных месторождений с применением комбинированной выемки руд // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №3. С. 35-44.
24. Maloletnev A.S., Mazneva O.A., Naumov K.I. Breparation of granulated domestic fuel from small coal fractions of the Moscow and Kansk-Achinsk basins // Solid Fuel Chemistry. 2012, vol. 46, no. 2, pp. 114-120.
25. Смагин В.П., Федорко П.В., Федорко Н.П. Анализ использования комбайна Wirtgen 2200SM при разработке сложноструктурных угольных пластов на разрезе «Черемховский» // Горная промышленность. 2015. №2. С. 74-76.

References

1. Trubetskoy K.N., Zakharov V.N., Galchenko Yu.P. Nature-like and convergent technologies in the development of mineral resources of the lithosphere. *Vestnik Rossiiskoy akademii nauk* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences]. 2020;90(6):560-566. (In Russ.)
2. Afum B.O., Ben-Awuah E., Askari-Nasab H. A mixed integer linear programming framework for optimising the extraction strategy of open pit - underground mining options and transitions. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2019;34(10):700-724.
3. LaRoche-Boisvert M., Dimitrakopoulos R. An application of simultaneous stochastic optimization at a large open-pit gold mining complex under supply uncertainty. *Minerals*. 2021;11(2). Article ID 172.
4. Sekisov A., Rasskazova A. Assessment of the possibility of hydrometallurgical processing of low-grade ores in the oxidation zone of the Malmyzh Cu-Au porphyry deposit. *Minerals*. 2021;11(1). Article ID 69.
5. Baninla Y., Zhang M., Lu Y., Liang R., Zhang Q., Zhou Yu., Khan K. A transitional perspective of global and regional mineral material flows. *Resources, Conservation and Recycling*. 2019;140:91-101.
6. Sekisov A.G., Shevchenko Yu.S., Lavrov A.Yu. Explosive injection preparation of ores for leaching. *Fundamentalnye problemy formirovaniya tekhnogennoy geosredy: sb. nauch. st.* [Fundamental problems of the formation of the industry-related geo-environment: Collection of research papers]. Novosibirsk, 2012, pp. 125-132. (In Russ.)
7. Sekisov G.V., Cheban A.Y. Low-waste mining technology for structurally complex deposits with mixed-type process flows of ore extraction and processing. *Journal of Mining Science*. 2021;57(6):978-985.
8. Shchadov V.M. *Otkrytaya razrabotka slozhnostrukturnykh ugolnykh mestorozhdeniy Vostochnoy Sibiri i Dalnego Vostoka* [Open-pit mining of complex-structured coal deposits in Eastern Siberia and the Far East]. Moscow: Publishing House of Moscow State Mining University, 2004, 298 p. (In Russ.)
9. Azev V.A., Gartman A.A., Khazhiev V.A. Technology parameters of open-pit coal mining of flat dipping deposits using robotization of road transport. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022;20(2):5-12. (In Russ.)
10. Cheban A.Yu. Improving geotechnology of extraction of thin ore bodies using boom-type roadheaders. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Nauki o Zemle* [News of Tula State University. Earth Sciences]. 2020;(1):340-348. (In Russ.)

11. Mohd Im. Variation of production with time, cutting tool and fuel consumption of surface miner 2200 SM 3.8. International Journal of Technical Research and Applications. 2016;(1):224-226.
12. Cheban A.Yu. A method of mining operation for small coal strip mines using an advanced surface miners. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin]. 2019;(2):36-42. (In Russ.)
13. Ermakov S.A., Il A.P., Khosoev D.V. Assessment of the operation performance of Wirtgen surface miners at the Elga hard coal deposit. *Gornaya promyshlennost* [Mining Industry]. 2018;(6):77-79. (In Russ.)
14. Kumar C., Murthy V., Kumaraswamidhas L., Prakash A. Influence of cutting drum specifications on the production performance of surface miner under varied rock strength - some investigations. *Journal of Mines, Metals and Fuels*. 2016;64:181-186.
15. Cheban A.Yu. On determination of the capacity level of surface miners under various operating conditions. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies]. 2014;(3):145-148. (In Russ.)
16. Klementeva I.N., Kuziev D.A. An actual status and prospects for development of surface miners designed for blastless layer-by-layer excavation of solid rock. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin]. 2019;(2):123-128. (In Russ.)
17. Burdonov A.E., Cheban A.Yu., Khrunina N.P., Prokhorov K.V. Improving the quality of mineral raw materials in mining of complex-structured deposits by modernizing the working equipment of surface miners. *Ekologiya i promyshlennost Rossii* [Ecology and Industry of Russia]. 2017;21(11):4-9. (In Russ.)
18. Palei S.K., Karmakar N.C., Paliwal P., Schimm B. Optimization of productivity with surface miner using conveyor loading and truck dispatch system. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2013;2(9):393-396.
19. Cheban A.Yu. The classification of designs of surface miners. *Nedropolzovanie XXI vek* [Subsoil Use in the 21st Century]. 2015;(5):64-69. (In Russ.)
20. Pikhler M., Pankevich Yu.B., Nikolaev D.V. The first results of the operation of the Wirtgen 2500SM surface miner at the Kivioli shale quarry (Estonia). *Gornaya promyshlennost* [Mining Industry]. 2006;(3):20-22. (In Russ.)
21. Kuznetsov A.G., Shteintsaig R.M., Voronkov G.Ya., Shenderov A.I., Aleksandrov A.A. Application of methods of physical and chemical dilution of solid rock masses during the operation of machines of the continuous surface miner type. *Gornaya promyshlennost* [Mining Industry]. 1997;(4):3-7. (In Russ.)
22. Panishev S.V., Khosoev D.V., Matveev A.I. Increasing efficiency of mining of overburden rocks and coals at the Elga coal deposit in Yakutia by their dilution with surfactants. *Gornaya promyshlennost* [Mining Industry]. 2021;(1):98-104. (In Russ.)
23. Cheban A.Yu., Sekisov A.G. Improvement in the technology for the development of complex deposits applying combined ore extraction. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022;20(3):35-44. (In Russ.)
24. Maloletnev A.S., Mazneva O.A., Naumov K.I. Preparation of granulated domestic fuel from small coal fractions of the Moscow and Kansk-Achinsk Basins. *Solid Fuel Chemistry*. 2012;46(2):114-120.
25. Smagin V.P., Fedorko P.V., Fedorko N.P. Analysis of the Wirtgen 2200SM surface miner operation at the Cheremkhovskoe opencast mine in complex-structured coal beds. *Gornaya promyshlennost* [Mining Industry]. 2015;(2):74-76. (In Russ.)

Поступила 05.05.2023; принята к публикации 13.09.2023; опубликована 25.12.2023
Submitted 05/05/2023; revised 13/09/2023; published 25/12/2023

Чебан Антон Юрьевич – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт горного дела Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИГД ХФИЦ ДВО РАН), Хабаровск, Россия.
Email: chebanay@mail.ru. ORCID 0000-0003-2707-626X

Anton Yu. Cheban – PhD (Eng.), Associate Professor, Lead Researcher, Mining Institute of the Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (MI KhFRC FEB RAS), Khabarovsk, Russia.
Email: chebanay@mail.ru. ORCID 0000-0003-2707-626X

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 622.271.3
DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-4-13-22



УСЛОВИЯ И ОПЫТ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ НА БАЗЕ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ВОСТОЧНЫХ РЕГИОНОВ РОССИИ

Ческидов В.И., Гаврилов В.Л., Резник А.В., Немова Н.А.

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, Новосибирск, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Роль угля в мировом энергетическом балансе, несмотря на ряд сложностей, остаётся высокой при росте объемов потребления, преимущественно странами Азии и Африки. Объемы добычи и экспорта угля из России будут возрастать за счёт её восточных регионов. Использование накопленных знаний о разработке крупных угольных месторождений позволяет организовать оценку и освоение новых объектов недропользования на более высоком качественном уровне. **Цель работы.** Анализ условий и опыта работы угледобывающих комплексов Кузбасса, КАТЭКа и Южной Якутии с позиций их последующего использования при освоении новых месторождений. **Используемые методы.** Анализ сведений о ресурсной базе, эффективности применяемых и планируемых к применению решений на предприятиях по добыче и поставкам угля потребителям. Синтез подходов к оценке и рациональному управлению крупными промышленными угольными комплексами. **Новизна.** Показано, что за основу крупных комплексов для открытой угледобычи повсеместно приняты наиболее значимые по запасам и качеству углей месторождения брахисинклинального типа с благоприятными горно-геологическими условиями. Выявлено несоответствие ряда проектных решений реальным условиям функционирования комплексов и эксплуатации разрезов, особенно в части заявленной потребности в угле, сложности горно-геологических условий разработки, выбора типов горно-транспортного оборудования и способов осушения. **Результат и практическая значимость.** Отмечено, что ресурсная база угольных комплексов достаточна для устойчивой длительной добычи, но их потенциальные природные возможности не всегда используются в полной мере. Рассмотрены тенденции развития промышленных комплексов с использованием кластерного подхода как организационной формы взаимодействия всех субъектов освоения месторождений и создаваемых на их основе цепочек поставок угольной продукции.

Ключевые слова: уголь, запасы, месторождение, брахисинклиналь, открытые горные работы, промышленный комплекс, кластер

Работа выполнена в рамках проекта №121051900145-1.

© Ческидов В.И., Гаврилов В.Л., Резник А.В., Немова Н.А., 2023

Для цитирования

Условия и опыт формирования промышленных комплексов на базе угольных месторождений восточных регионов России / Ческидов В.И., Гаврилов В.Л., Резник А.В., Немова Н.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №4. С. 13-22. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-13-22>



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

CONDITIONS AND EXPERIENCE OF ESTABLISHING INDUSTRIAL COMPLEXES AT COAL DEPOSITS IN THE EASTERN REGIONS OF RUSSIA

Cheskidov V.I., Gavrilov V.L., Reznik A.V., Nemova N.A.

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

Abstract. Relevance. Despite a number of difficulties, the role of coal in the global energy balance keeps remaining important with an increase in consumption volumes, mainly by Asian and African countries. The volumes of coal production and export from Russia will increase due to its Eastern regions. The use of accumulated knowledge about the development of large coal deposits contributes to the evaluation and development of new subsoil use objects at a higher qualitative level. **Objectives.** The research is aimed at analyzing the conditions and experience of the operation of the coal mining complexes of Kuzbass, the Kansk-Achinsk Coal Basin and South Yakutia from the standpoint of their subsequent use in the development of new deposits. **Methods Applied.** The analysis of information on the resource base, efficiency of solutions used and planned for use at enterprises for coal production and supply to consumers; synthesis of approaches to the assessment and rational management of large industrial coal complexes. **Originality.** It has been shown that large complexes for open-pit coal mining are based on the most important brachysyncline-type deposits in terms of coal reserves and quality with favorable mining and geological conditions. The authors revealed a discrepancy between a number of design solutions and the actual conditions of functioning of the complexes and the operation of open pits, especially in terms of the declared demand for coal, the complexity of mining and geological conditions for development, the choice of types of mining transport equipment and drainage methods. **Result and practical relevance.** It has been noted that the resource base of coal complexes is sufficient for sustainable long-term mining, but their potential natural resources are not always fully used. The paper describes trends in the development of industrial complexes using the cluster approach as an organizational form of interaction between all the facilities of deposit development and the coal products supply chains created on their basis.

Keywords: coal, reserves, field, brachysyncline, open-pit mining, industrial complex, cluster

The research was conducted as part of Project No.121051900145-1.

For citation

Cheskidov V.I., Gavrilov V.L., Reznik A.V., Nemova N.A. Conditions and Experience of Establishing Industrial Complexes at Coal Deposits in the Eastern Regions of Russia. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 4, pp. 13-22. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-13-22>

Введение

Рост населения в мире и необходимость объективного улучшения его благосостояния способствуют увеличению общего количества производимой энергии. Ряд экономически развитых стран активно декларирует курс на уменьшение применения угля, газа, ядерной энергии с максимально возможным переходом к середине XXI века на возобновляемые источники энергии (ВИЭ). Часто корректируемые и отличающиеся друг от друга прогнозы аналитических организаций мира и России свидетельствуют о том, что при опережающем развитии ВИЭ и увеличении её доли в глобальном топливном балансе традиционные источники, включая уголь, в целом не потеряют своего значения [1-3]. Нарастающая неопределенность в мире [4] будет способствовать тому, что глобальная роль твёрдого топлива, как самого распространённого, доступного и дешевого энергоносителя, может сохраниться на средне- и долгосрочную перспективу с сокращением его доли максимально на 14% к 2030 году и на 49% к 2050 году. В Азии, ряде развивающихся и экономи-

чески отсталых стран будет наблюдаться противоположная тенденция. В результате объёмы потребления угля на планете, достигшие в 2022 г. 8,3 млрд т, на краткосрочную перспективу должны сохраниться [5, 6]. Дополнительной причиной успешности реализации такого сценария является развитие эффективных чистых технологий утилизации угля, в первую очередь в электроэнергетике, позволяющих минимизировать негативное воздействие на окружающую среду [7].

На территории России в 22-х угольных бассейнах расположено 146 месторождений с запасами в 120 млрд т каменного угля, 146 млрд т – бурого и 9 млрд т – антрацитов. 63% всех запасов пригодны для открытой разработки. На начало 2022 года в стране действовало 126 разрезов и 50 шахт. 75% российской добычи угля осуществляется в азиатской части страны – в Кузнецком, Канско-Ачинском и Южно-Якутском, Минусинском, Горловском, Иркутском, Сахалинском, Буреинском бассейнах (рис. 1). А более 75 % угля добывается производительным, экономичным и безопасным открытым способом [8] и этот тренд по Энергетической стратегии РФ на период до 2035 года будет сохраняться.



Рис. 1. Добыча и направления перевозки угля в Сибири и на Дальнем Востоке в 2022 году, млн т
Fig. 1. Coal production and transportation routes in Siberia and the Far East in 2022, million tons

С учетом текущего и прогнозируемого состояния внешнего и внутреннего рынка по Программе развития угольной промышленности России до 2035 года предполагается увеличить добычу угля до 485 млн т по консервативному сценарию и до 668 млн т по оптимистическому сценарию. Основное наращивание угледобычи намечается в Сибири и на Дальнем Востоке, что обусловлено наличием надежной ресурсной базы и растущей потребностью азиатских стран, в первую очередь Китая и Индии, в качественных углях. Основной объем добычи при этом будет производиться промышленными комплексами большой мощности с приоритетом открытого способа разработки. В таких условиях актуализируется целесообразность изучения условий формирования и анализа многолетнего опыта эксплуатации аналогичных объектов в восточных регионах России для последующего использования полученных синтезированных результатов при оценке, проектировании и освоении новых крупных и средних месторождений с максимально возможным уровнем использования их природного потенциала.

Методы и материалы исследования

Применен анализ сведений о ресурсной базе, используемых и планируемых к применению технических, технологических и организационных решений на действующих и новых предприятиях по добыче и поставкам угля потребителям на внутренний и внешний рынок, а также синтез подходов к оценке эффективности работы промышленных комплексов по добыче угля и рациональному системному управлению ими. Изучены условия освоения месторождений и обобщены их особенности. Информационной основой исследования послужили материалы периодической печати, геологические, проектные и производственные отчеты ряда предприятий, сформированные и пополняемые авторские базы данных по ряду ме-

сторождений и предприятий Кузбасса, Южной Якутии и КАТЭКа, другие аналитические источники.

Результаты исследования и их обсуждение

Государственным балансом запасов России по состоянию на начало 2022 года в Сибирском федеральном округе были учтены запасы углей 959-ти объектов (225 – действующие, 381 – подготовленные к освоению) в количестве 151,9 млрд т по категориям А+В+С₁ (разведанные), 62,6 млрд т – по категории С₂. 37,3 млрд т отнесены к забалансовым. В структуре разведанных запасов на каменные угли приходилось 46,6%, коксующиеся – 21,5%, особо ценные марки – 10,7%. Для открытых работ пригодны 67,4% запасов, в том числе более востребованных рынком каменных углей 15,1%. Основная часть разведанных запасов угля округа приходится на Кузбасс (58,5%), Красноярский край (30,9%). В Дальневосточном федеральном округе учтены 183 месторождения (516 объектов). Разведанные балансовые запасы здесь составили 25,2 млрд т, по категории С₂ – 10,8 млрд т, забалансовые – 6,5 млрд т. Для открытых работ пригодны 66,4% запасов, в том числе каменных углей – 15,6%, особо ценных – 6,4% (см. таблицу) [9-11].

Сравнение структуры запасов и добычи угля показывает, что более интенсивно отрабатываются месторождения каменного угля (СФО – доли в запасах 46,6% и добыче 80,2%, ДВО – 40,1 и 60,5%) преимущественно открытым способом (СФО – 67,4 и 79,4%, ДВО – 66,4 и 89,3%) с акцентом на извлечение более ценных марок угля. С использованием этих запасов, в дополнение к существующим мощностям, возможно строительство новых разрезов различной производительности с доведением суммарных объемов добычи в данных регионах до значений, удовлетворяющих потребности экономики в угле по любому из возможных сценариев развития отрасли.

Таблица. Запасы и добыча угля в Сибирском и Дальневосточном федеральных округах
T a b l e. Coal reserves and mining in the Siberian and Far Eastern federal districts

Федеральный округ / вид и марка угля	Балансовые запасы на 01.01.2022 г.		Добыча в 2021 г.		
	A+B+C ₁		C ₂	млн т	Доля, %
	млрд т	Доля в запасах, %			
Сибирский	151,9	100	62,6	303,9	100
Бурый	80,0	52,7	39,3	41,2	13,5
Каменный:	70,8	46,6	22,7	243,6	80,2
– коксующийся	32,6	21,5	6,2	71,9	23,7
– особо ценные марки	16,2	10,7	2,8	31,1	10,2
Антрацит	1,1	0,7	0,6	19,1	6,3
Для открытых работ	102,4	67,4	49,5	241,3	79,4
Бурый	78,9	51,9	38,0	41,2	13,5
Каменный:	22,9	15,1	11,2	181,0	59,6
– коксующийся	3,5	2,3	1,3	39,4	13,0
– особо ценные марки	0,5	0,4	0,1	7,6	2,5
Антрацит	0,6	0,4	0,4	19,1	6,3
Дальневосточный	25,2	100	10,8	82,1	100
Бурый	15,0	59,8	4,7	32,4	39,5
Каменный:	10,1	40,1	6,0	50,0	60,5
– коксующийся	4,4	17,4	2,8	24,7	30,0
– особо ценные марки	4,3	16,9	2,7	24,6	30,0
Антрацит	< 0,1	0,1	< 0,1	0,0	0,0
Для открытых работ	16,7	66,4	4,7	73,3	89,3
Бурый	12,8	50,8	3,2	32,3	39,3
Каменный:	3,9	15,6	1,5	41,0	50,0
– коксующийся	1,7	6,6	0,4	19,7	24,1
– особо ценные марки	1,6	6,4	0,4	19,7	24,0
Антрацит	<0,1	< 0,1	0,0	0,0	0,0

Опыт угледобычи в России говорит о том, что крупные месторождения в прошлом веке послужили основой для формирования территориально-производственных комплексов (ТПК), необходимость создания которых была обусловлена растущей потребностью в углях отечественных и зарубежных потребителей. В планы ТПК включали разрезы, шахты, предприятия по переработке угля, инженерные и транспортные коммуникации, производственную и социальную инфраструктуру, предприятия энергетики, черной металлургии. С учетом преимуществ открытого способа разработки месторождений формирование комплексов производилось, как правило, на базе разрезов. Условия и особенности создания ТПК рассмотрим на примере Ерунаковского (Кузбасс), Канско-Ачинского и Южно-Якутского, созданных в 70-80-е годы прошлого столетия в соответствии с советскими директивными решениями и которые продолжают работу и сейчас. Каменные энергетические угли Ерунаковского (разрез «Талдинский»)

предназначались в основном для обеспечения внутреннего рынка, бурые канско-ачинские – как топливная база энергетического комплекса, включающего разрез «Березовский-1» и Березовскую ГРЭС, дополненного далее разрезами «Назаровский», «Бородинский» и рядом других, менее мощных. Концентрат коксующихся углей, добываемых в Южной Якутии разрезом «Нерюнгринский» с проектной мощностью в 13 млн т в год, предназначался в основном для поставки в Японию в течение как минимум 15 лет в рамках межгосударственного соглашения. Окисленный уголь и промпродукт обогащения использовались для выработки электрической и тепловой энергии в восточных регионах страны. Анализируемые объекты на протяжении многих лет с той или иной степенью успешности способствовали достижению бизнес-интересов недропользователей и связанных с ними структур и явились одним из базисов социально-экономического развития районов их размещения, источником наполнения бюджетов разного уровня.

Важными элементами ТПК должны были стать новые крупные объекты: на юге Якутии ГЭС на горных реках региона, металлургическое производство, сырьевой базой для которого послужили бы Горкитское, Тарыннахское, Таежное, Дёсовское, Пионерское, Сиваглинское и другие железорудные месторождения. Планы в этой части остались не реализованными. В результате развитие региона ассоциируется с ценными марками угля для преимущественных поставок на экспорт, дополняемое добычей рудного золота и трубопроводной транспортировкой нефти и газа. В последние годы здесь построены шахты «Денисовская», «Игналинская», обогатительные фабрики, ряд малых разрезов. Активно развивается Эльгинский комплекс, начато строительство Сылахского. В Ерунаковском ТПК построены разрезы «Талдинский Северный», «Ерунаковский», шахты «Кыргайская», «Котинская». В составе КАТЭК только в его западной части намечалось строительство 6-ти разрезов мощностью до 60 млн т угля в год, 4 ГРЭС мощностью до 6400 МВт, 7 энерготехнологических комбинатов для переработки каждым по 50 млн т углей в год и сопутствующих им объектов. Программа была реализована также частично (1 очередь разреза «Березовский-1» мощностью 27,5 из 55 млн т/год, Березовская ГРЭС с тремя котлоагрегатами из восьми проектных, вспомогательными объектами, социальной и жилой сферой).

Анализ капитальных вложений в создание рассматриваемых ТПК [12] показывает, что на долю самих добывающих предприятий с производственной инфраструктурой пришлось 62,0-67,0% всех затрат. Расходование остальных средств было связано с созданием общерайонных объектов и жилищно-гражданским строительством (рис. 2). Высокая доля вложений в разрезы была связана со сложностью горно-геологических условий осваиваемых месторождений, значительным объемом горно-капитальных работ, высокой стоимостью техники. В современных условиях практика создания объектов по добыче и переработке угля, в том числе в инфраструктурно неразвитых районах, свидетельствует о повсеместном откaze собственников предприятий от строительства капитального жилья в районах ведения горных работ в пользу вахтовых поселков с минимальным развитием производственной инфраструктуры.

Большое значение при обосновании направлений развития угледобычи и освоения новых угольных районов, безусловно, имеет выбор месторождения, наиболее пригодного для формирования промышленных комплексов. При оценке значимости, как правило, учитывается комплекс факторов: горно-геологические условия залежи (запасы, марка и качество угля, коэффициент вскрыши, угленосность), освоенность района (наличие транспортных коммуникаций, ЛЭП, производственных и жилых объектов); удаленность от потребителей угля; возможные экологические последствия от работы горного производства (площадь и ценность изымаемых земель, наличие

заповедников и заказников, источников вод), экономическая эффективность (чистый дисконтированный доход, рентабельность, окупаемость вложений) и др. Основные месторождения анализируемых ТПК представлены брахисинклинальными геологическими структурами, обладающими рядом благоприятных для ведения открытых горных работ особенностей [13]. Выделим следующие: изменение горизонтальной мощности пластов по площади и глубине из-за непостоянства значений углов их падения (от 0° в замковой части складки до 90° на ее крыльях); наличие участков с пологим залеганием пластов по их выходам под наносы и в замковой части мульды; различный метаморфизм углей по глубине, предопределяющий различия в марочном составе.

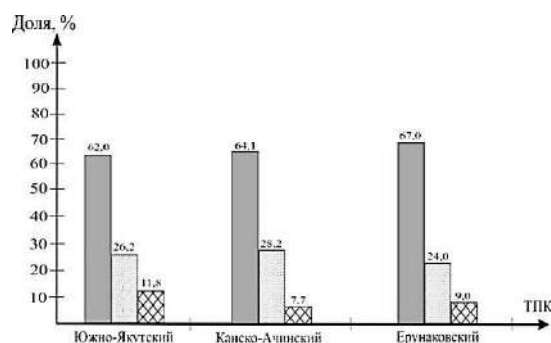


Рис. 2. Доля капитальных вложений при строительстве угольного комплекса: 1 – разрез; 2 – общерайонные объекты; 3 – гражданское строительство

Fig. 2. The share of capital expenditures in the construction of the coal complex: 1 is an open pit; 2 are general district facilities; 3 is civil construction

В свою очередь, эти условия обеспечивают возможность применения ряда технологических преимуществ. Они связаны с: целесообразностью поэтапного освоения залежей с регулируемым текущим коэффициентом вскрыши и целенаправленным формированием емкостей для внутреннего отвалообразования вскрышных пород; включением наиболее угленасыщенных участков полей разрезов в первоочередную отработку; использованием бестранспортной технологии вскрышных работ с перевалкой пород драглайнами в выработанное пространство; добычей угля на участках поля разреза, не включенных в первоочередную отработку, организацией временных отвалов пород и последующим их удалением в экономически обоснованные сроки. Указанные возможности максимально были реализованы разрезом «Талдинский» в части: этапности горных работ; широкого использования бестранспортной технологии, включая временные породные отвалы; внутреннего отвалообразования вскрышных пород. Такой результативный подход к освоению брахисинклинальных залежей находит применение и сегодня, например на Эльгинском месторождении коксующихся и энергетических углей, представленном свитой угольных пластов.

Анализ результатов функционирования ТПК позволяет выделить следующие моменты: недостаточно обоснованный прогноз потребности в углях на перспективу и связанный с ним завышенный объем строительства (на КАТЭК количество сжигаемых на Березовской ГРЭС углей разреза «Березовский-1» долго не превышало 5 млн т/год при проектной потребности 25 млн т/год); неполное соответствие применяемого оборудования горно-геологическим условиям осваиваемых месторождений, потребовавшее его замены при эксплуатации разрезов (Южная Якутия и КАТЭК); необходимость ввода в эксплуатацию в районе базового разреза, обеспечивающего полную потребность в углях, других горных предприятий; неполный учёт на стадиях геолого-экономической оценки и проектирования сложности строения месторождений и неоднородности в них свойств угля и вмещающих пород, обусловивший, например, в Южной Якутии снижение выхода концентрата из единицы погашаемых запасов и уменьшение доли ценных марок коксующегося угля.

Основное выемочное оборудование на разрезах «Нерюнгринский» и «Березовский-1» из-за ряда причин было заменено. В первом случае речь идет об экскаваторах фирмы «Marion» с ковшом 20 м³, которые по конструктивным и техническим характеристикам оказались не пригодными для экскавации крепких вскрышных пород (ограниченные усилия резания, не удовлетворительная кинематическая схема для конкретных горнотехнических условий). После недолгого использования они были заменены на отечественные и зарубежные машины, успешно эксплуатируемые до настоящего времени. Вскрышной комплекс непрерывного действия на разрезе «Березовский-1» в составе роторного экскаватора ЭРШРД-5250, межступенного перегружателя и отвалообразователя с длиной стрел 65 и 190 м успешно эксплуатировался первые 8 лет по толще слабосцементированных пород. После обнаружения крепких породных включений с коэффициентом крепости по шкале М.М. Протоdjяконова до 14 их отработка роторными экскаваторами оказалась невозможной [14]. Комплекс был заменен на мехлопаты ЭКГ-10 и автосамосвалы. Неудачным оказалось и решение по осушению разреза подземным способом на основе сложной и дорогой дренажной системы, включавшей: ствол глубиной 114 м; подземные выработки по пласту со скважинами в массиве вскрышных пород общей протяженностью более 20 км. Опыт эксплуатации показал удовлетворительные результаты по углю и невысокую эффективность осушения вскрышного массива из-за его низкой фильтрационной способности. Важной причиной указанных нестыковок явилась неполная геологическая изученность залежей.

В сложившихся в отечественном минерально-сырьевом комплексе условиях функционирование предприятий даже в рамках одной цепочки поставок часто осуществляется разрозненно. В отработку вовле-

каются разбросанные по регионам угольные ресурсы с необоснованным расширением зон экологической напряженности. Это не всегда соответствует логике рационального недропользования. К примеру, вопрос повышения эффективности функционирования КАТЭК определяется, прежде всего, потребностью в угле, которая на четверть обеспечивается «малыми» разрезами (более 10 единиц). Но весь требуемый объем угля может быть произведен разрезами «Березовский-1», «Назаровский», «Бородинский» с масштабным снижением негативного воздействия на природную среду. Для разреза «Березовский-1» решающее значение, безусловно, имеет перспектива развития основного потребителя угля – Березовской ГРЭС. В настоящее время здесь используется лишь незначительная часть имеющихся технических возможностей перегрузочного комплекса с системой забойных и магистральных конвейеров, позволяющего выдавать до 25 млн т угля в год для полного покрытия потребности ГРЭС мощностью 6400 МВт. Согласованная работа разреза и электростанции возможна при единой системе управления с расширением объемов добычи угля для более полного удовлетворения потребностей Алтайского края и Республики Алтай в энергии с использованием введенной ЛЭП-750.

В границах Ерунаковского угольного района добыча угля ведется подземным и открытым способами. Потенциальные возможности последнего, как более безопасного и экономичного, оцениваются на уровне 45-50 млн т в год. Подземную добычу угля целесообразно сосредоточить на месторождениях с запасами дефицитных сортов. Это особенно важно с позиций исключения серьезных аварийных ситуаций, имевших место, например, на шахте «Ульяновская».

ТПК, представлявшие сочетание субъектов хозяйствования в одном районе, при котором достигается эффект за счет формирования предприятий в соответствии с природными условиями, транспортным и природно-географическим положением района, способствовали в своё время повышению экономической эффективности функционирования отраслей и территорий. В условиях рыночной экономики и активного использования информационных технологий данная организационная форма стала не в полной мере учитывать влияние на результаты работы таких факторов, как: наличие частного капитала, малого и среднего бизнеса; децентрализованное управление; изменчивость и низкая предсказуемость внешней среды; конкуренция между предприятиями, включая находящиеся на одной территории; низкая способность адаптации участников ТПК к различным изменениям, платность и возвратность финансовых ресурсов [15]; возможность появления синергетического эффекта, при котором потенциал эффективно работающего объединения выше суммы потенциалов его отдельных субъектов [16].

Промышленные предприятия для повышения стабильности своей работы были вынуждены адаптироваться к такой сложной ситуации. В нашей стране

достаточно широкое применение в настоящее время получили такие варианты пространственной организации производства, как свободные экономические зоны, территории опережающего развития. Одним из инструментов, способствующих успешности их использования, является применение преимуществ кластерного подхода. Концепция кластера как географически соседствующих взаимосвязанных компаний и связанных с ними организаций, действующих в одной сфере, характеризующихся общностью деятельности и взаимодополняющих друг друга [17], развиваемая научно-техническим сообществом в целом, расширяет представления о конкурентоспособном эффективном ТПК [18-21]. Состав компаний, обеспечивающих развитие инноваций, при этом может быть и рассредоточенным в пространстве, включая рамки нескольких кластеров [22]. А их устойчивое развитие, оцениваемое одновременно с позиций экономической, технологической, экологической и социальной приемлемости и справедливости, целесообразно осуществлять, например, с применением: комплексных систем менеджмента качества и различных методов квалитиметрии [23-25]; интегральных индикаторов, характеризующих работу промышленных комплексов с учетом рациональности потребления всех ресурсов; минимизации влияния на природную среду; обеспечения равных возможностей для всех участников на территории влияния [26].

При рассмотрении кластеров акцент может делаться на отдельных направлениях их функционирования. Например, при создании и полноценном развитии кластера во Внутренней Монголии Китая за счёт централизации добычи и использования угля наряду с увеличением добавленной стоимости и прибыли могут снизиться объемы образуемых отходов с уменьшением количества потребляемых водных ресурсов в условиях их постоянной нехватки [27]. Применение синергетического подхода к изучению влияющих факторов позволит при определенных обстоятельствах перейти в модели безотходного рециклинга к активной трансформации отходов угольной промышленности для уменьшения объемов отходов, загрязняющих окружающую среду [28]. А создание пилотного энерготехнологического комплекса, реализующего инновационные технологии, приведёт к повышению глубины и полноты переработки угля с оптимизацией систем энергоснабжения путем сжигания отсевов угля, шахтного метана и попутного газа, получаемых в результате работы основного производства [29].

К настоящему времени на КАТЭКе, в Ерунаковском районе Кузбасса и Южной Якутии с той или иной эффективностью действуют крупные угольные комплексы, имеющие ряд признаков кластера. Например, в Нерюнгринском районе, которому оказывается достаточно эффективная государственная поддержка, в том числе через территорию опережающего развития «Южная Якутия», помимо Нерюнгринского месторождения, масштабно отрабатываются открытым и

подземным способом Чульмаканское и Денисовское, начаты работы на Кабактинском, Несмотря на достаточно удаленность от районного центра до объектов освоения в регионе, к угольному кластеру можно отнести и крупные комплексы по добыче и поставкам угля с Эльгинского и Сыллыкского месторождений, где добываются дефицитные сорта коксующегося и энергетического угля. В целом объем добычи в Южно-Якутском бассейне в 2022 году составил 38,6 млн т (на 25% больше, чем в 2021 году) [7]. Из них, по данным министерства промышленности и геологии Якутии, экспортировано почти 26,0 млн т.

В то же время территориально близкие угледобывающие, инфраструктурные, строительные, ремонтные, вспомогательные и сервисные предприятия, принадлежащие разным конкурирующим собственникам, между собой часто слабо связаны и дополняют друг друга лишь частично. Причины такого положения, ведущие к снижению конкурентоспособности территорий, эффективности освоения георесурсов и синергии потенциального взаимовыгодного сотрудничества предприятий в составе полноценных кластеров, здесь не рассматриваются и являются предметом другого исследования. Его цель – создание механизма реализации корректируемых в динамике параметров стратегии и тактики развития компаний в составе минерально-сырьевых кластеров, учитывающих российскую, региональную и локальную специфику.

Заключение

Анализ опыта создания ряда угольных ТПК в восточных регионах России показал, что решающее значение на эффективность их функционирования оказывает достоверность заявленной потребности в углях, горно-геологические условия и изученность базового месторождения, степень освоенности районов. Рассмотренные комплексы (Южно-Якутский, Канско-Ачинский, Ерунаковский) ориентированы на применение более безопасного и экономичного открытого способа добычи с отработкой месторождений брахисинклинального типа, обладающих рядом благоприятных горно-геологических условий.

Опыт эксплуатации комплексов подтверждает правильность принятых проектных решений в целом. Вместе с тем следует отметить ряд имевшихся негативных фактов, потребовавших проведения затратных мероприятий по корректировке технологических схем и замене горнотранспортного оборудования. В числе причин такой ситуации можно отметить недооценку факторов геологической неопределенности, связанную со сложившимся на момент принятия решений подходом к оценке угольных месторождений. Результаты рассмотрения особенностей работы трёх крупных производственных угольных комплексов, выявленные в их работе достоинства и недостатки, могут быть использованы недропользователями при планировании и проектировании новых угледобывающих производств.

В современных условиях ТПК как организационная форма не в полной мере учитывает влияние ряда важных для рыночной экономики факторов. Это способствует использованию более адаптированных форм, включая концессии, свободные экономические зоны, территории опережающего развития, функционирующие в том числе как кластеры, объединяющие основные аспекты деятельности по добыче и поставкам угля на конкурентные рынки. Развитие и использование потенциальных преимуществ кластеров предполагает совершенствование механизма реализации изменяемых в динамике решений для согласованной работы всех предприятий, входящих в цепочки поставок продукции.

Список источников

1. IEF Outlook Comparison Report // IEA-IEF-OPEC Symposium on Energy Outlooks. 2023. February. <https://www.ief.org/events/13th-iea-ief-opec-symposium-on-energy-outlooks> (дата обращения 15.03.2023).
2. BP Energy Outlook: 2023 edition // BP Energy Economics <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics.html> (дата обращения 15.03.2023).
3. Плакиткин Ю.А., Плакиткина Л.С., Дьяченко К.И. Уголь как основа большого цивилизационного «скачка» и новых возможностей мирового развития // Уголь. 2022. №8. С. 77-83.
4. Гаврилов В.Л., Ткач С.М. О цифровых технологиях горных предприятий в условиях нестабильности, неопределённости, сложности и неоднозначности // ГИАБ. 2019. №11 (спец. выпуск 37). С. 112-121.
5. Coal Market Update // IEA. International Energy Agency. 2023. July. 23 p. <https://www.iea.org> (дата обращения 14.09.2023).
6. Новак А. Энергетическая политика России: разворот на Восток // Энергетическая политика. 2023. №6. С. 14-19.
7. Рябов Г.А., Тумановский А.Г., Епихин А.Н. Декарбонизация при производстве электроэнергии и тепла на твердотопливных электростанциях // Теплоэнергетика. 2023. № 1. С. 5-20.
8. Петренко И.Е. Итоги работы угольной промышленности России за 2022 год // Уголь. 2023. №3. С. 21-33.
9. Латыпов З.Г., Кандалова Е.Б. Госбаланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации на 01 января 2022 года. Уголь. Сибирский федеральный округ / ФГБУ «Росгеолфонд». М., 2022. Вып. 91. Т. 7. Ч. 1. 488 с.
10. Гусарева Т.В. Госбаланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации на 01 января 2022 года. Уголь. Сибирский федеральный округ / ФГБУ «Росгеолфонд». М., 2022. Вып. 91. Т. 7. Ч. 2. 236 с.
11. Крылов В.В., Гусарева Т.В., Кандалова Е.Б. Госбаланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации на 01 января 2022 года. Уголь. Дальне-восточный федеральный округ / ФГБУ «Росгеолфонд». М., 2022. Вып. 91. Т. 8. 440 с.
12. Cheskidov V.I. Performance potential of the coal strip mining in the east of Russia // Journal of Mining Science. 2007, vol. 43, no. 4, pp. 429-435.
13. Specifics of Open Pit Mining in Brachysyncline-Type Coalfields / Cheskidov V.I., Gavrilov V.L., Khoyutnov E.A., Reznik A.V., Nemova N.A. // Journal of Mining Science. 2022, vol. 58, no. 4, pp. 561-570.
14. Cheskidov V.I., Reznik A.V. Open pit mining technologies for watered lignite deposits in the Kansk-Achinsk basin // Journal of Mining Science. 2019, vol. 55, no. 1, pp. 96-104.
15. Стрельник М.М. Методы управления и оценки рисков предприятий в условиях кластера. СПб.: Изд-во СПбГЭУ, 2018. 152 с.
16. Фонов А.Г., Бергаль О.Е. Территориальные кластеры в системе пространственного развития: зарубежный опыт // Пространственная экономика. 2020. Т. 16. №4. С. 113-135.
17. Портер М.Э. Конкуренция: пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2005. 608 с.
18. Соболева С.Ю., Петрова А.Е. Трансформация понимания категории «кластер» // Психология. Экономика. Право. 2014. №4. С. 77-82.
19. Гагарина Г.Ю., Чайникова Л.Н., Сорокина Н.Ю. Промышленные кластеры в России: старые проблемы и новые вызовы // Вестник РЭУ им. Г.В. Плеханова. 2021. № 4. С. 78-85.
20. Комов И.В., Яковенко Н.В. «Кластер» как сложная организационно-экономическая система: подходы к дефиниции понятия // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2016. №1. С. 188-196.
21. Гаврилов В.Л., Васильев П.Н. Предпосылки формирования и перспективы развития Южно-Якутского угольного кластера // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири: материалы 13-й Международ. науч.-практ. конф., 28-29 сентября 2010. Кемерово, 2010. Ч. 2. С. 21-26.
22. Крюков В.А. Экономика знаний о недрах во времени и пространстве // Управление наукой: теория и практика. 2020. Т. 2. №4. С. 71-117.
23. Геотехнологии открытой добычи на месторождениях со сложными горно-геологическими условиями / отв. ред. С.М. Ткач. Новосибирск: Гео, 2013. 307 с.
24. Дранкова Н.А., Денисова Я.В. Проблемы эффективности системы менеджмента качества и пути их решения в условиях новой экономической среды // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №1. С. 65-73.
25. Фрейдина Е.В., Ботвинник А.А., Дворникова А.Н. Системное управление качеством углей при открытой разработке месторождений Сибири. Новосибирск: Наука, 2019. 264 с.
26. Майорова Т.В., Пономарева О.С., Павлова И.Е. Устойчивое развитие предприятий металлургической отрасли: аспекты, критерии, индикаторы //

Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №2. С. 140-147.

27. Шушнецов А.Ф., Чжан Яньцзе. Кластер Внутренней Монголии Китая по диверсифицированной переработке бурых углей // *Baikal Research Journal*. 2021. Т. 12. №1.
28. Хорешок А.А., Литвин О.И., Дубинкин Д.М. Синергетический подход к решению геоэкологических проблем угледобывающих и углеперерабатывающих субкластеров // *Уголь*. 2022. № 12. С. 82-87.
29. Краснянский Г.Л. Стратегия развития Караганского угольно-энергетического кластера // *ГИАБ*. 2015. №S1. С. 649-653.

References

1. IEF Outlooks Comparison Report. IEA-IEF-OPEC Symposium on Energy Outlooks. 2023. February. <https://www.ief.org/events/13th-iea-ief-opec-symposium-on-energy-outlooks> (Accessed on March 15, 2023)
2. BP Energy Outlook: 2023 edition. BP Energy Economics. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics.html> (Accessed on March 15, 2023)
3. Plakitkin Yu.A., Plakitkina L.S., Dyachenko K.I. Coal as the basis of a great civilization leap and new opportunities for world development. *Ugol* [Coal]. 2022;(8):77-83. (In Russ.)
4. Gavrilov V.L., Tkach S.M. About digital technologies of mining enterprises in the conditions of volatility, uncertainty, complexity and ambiguity. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin]. 2019;(11(special issue 37)):112-121. (In Russ.)
5. Coal Market Update. IEA (International Energy Agency). 2023. July. 23 p. <https://www.iea.org> (Accessed on September 14, 2023).
6. Novak A. Russia's energy policy: A turn to the East. *Energeticheskaya politika* [Energy Policy]. 2023;(6):14-19. (In Russ.)
7. Ryabov G.A., Tumanovskii A.G., Epikhin A.N. Decarbonization of heat and power generation at fossil fuel power plants. *Teploenergetika* [Thermal Engineering]. 2023;(1):5-20. (In Russ.)
8. Petrenko I.E. 2022 Russia's coal industry performance. *Ugol* [Coal]. 2023;(3):21-33. (In Russ.)
9. Latypov Z.G., Kandalova E.B. *Gosbalans zapasov poleznykh iskopayemykh Rossiyskoy Federatsii na 01 yanvarya 2022 goda. Ugol. Sibirskiy federalnyi okrug* [State balance of mineral reserves of the Russian Federation as of January 01, 2022. Coal. Siberian Federal District]. Moscow: Federal State Budgetary Institution Rosgeolfond, 2022, iss. 91, vol. 7, part 1, 488 p. (In Russ.)
10. Gusareva T.V. *Gosbalans zapasov poleznykh iskopayemykh Rossiyskoy Federatsii na 01 yanvarya 2022 goda. Ugol. Sibirskiy federalnyi okrug* [State balance of mineral reserves of the Russian Federation as of January 01, 2022. Coal. Siberian Federal District]. Moscow: Federal State Budgetary Institution Rosgeolfond, 2022, iss. 91, vol. 7, part 2, 236 p. (In Russ.)
11. Krylov V.V., Gusareva T.V., Kandalova E.B. *Gosbalans zapasov poleznykh iskopayemykh Rossiyskoy Federatsii na 01 yanvarya 2022 goda. Ugol. Dalnevostochnyi federalnyi okrug* [State balance of mineral reserves of the Russian Federation as of January 01, 2022. Coal. Far Eastern Federal District]. Moscow: Federal State Budgetary Institution Rosgeolfond, 2022, iss. 91, vol. 8, 440 p. (In Russ.)
12. Cheskidov V.I. Performance potential of the coal strip mining in the east of Russia. *Journal of Mining Science*. 2007;43(4):429-435.
13. Cheskidov V.I., Gavrilov V.L., Khoyutanov E.A., Reznik A.V., Nemova N.A. Specifics of open pit mining in brachysyncline-type coalfields. *Journal of Mining Science*. 2022;58(4):561-570.
14. Cheskidov V.I., Reznik A.V. Open pit mining technologies for watered lignite deposits in the Kansk-Achinsk basin. *Journal of Mining Science*. 2019;55(1):96-104.
15. Strelnik M.M. *Metody upravleniya i otsenki riskov predpriyatiy v usloviyakh klastera* [Cluster enterprise risk management and assessment methods]. Saint Petersburg: Saint Petersburg State University of Economics, 2018, 152 p. (In Russ.)
16. Fonotov A.G., Bergal O.E. Territorial clusters in the spatial development system: foreign experience. *Prostranstvennaya ekonomika* [Spatial Economics]. 2020;16(4):113-135. (In Russ.)
17. Porter M.E. *Konkurentsia* [Competition]. Moscow: Williams, 2005, 608 p. (In Russ.)
18. Soboleva S.Yu., Petrova A.E. Transformation of understanding a cluster category. *Psikhologiya. Ekonomika. Pravo* [Psychology. Economics. Law]. 2014;(4):77-82. (In Russ.)
19. Gagarina G.Yu., Chaynikova L.N., Sorokina N.Yu. Industrial clusters in Russia: Old problems and new challenges. *Vestnik REU im. G.V. Plekhanova* [Vestnik of the Plekhanov Russian University of Economics]. 2021;(4):78-85. (In Russ.)
20. Komov I.V., Yakovenko N.V. "Cluster" as a complicated organizational and economic system: approaches to a definition of the concept. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle* [Proceedings of Tula State University. Earth Sciences]. 2016;(1):188-196. (In Russ.)
21. Gavrilov V.L., Vasiliev P.N. Prerequisites for the formation and development prospects of the South Yakutia coal cluster. *Prirodnye i intellektualnye resursy Sibiri: materialy 13-y Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Natural and Intellectual Resources of Siberia: Proceedings of the 13th International Scientific and Practical Conference]. Kemerovo, 2010, part 2, pp. 21-26. (In Russ.)
22. Kryukov V.A. Subsoil knowledge economy in time and space. *Upravlenie naukoj: teoriya i praktika* [Science Management: Theory and Practice]. 2020;2(4):71-117. (In Russ.)

23. Tkach S.M. *Geotekhnologii otkrytoy dobychi na mestorozhdeniyakh so slozhnymi gorno-geologicheskimi usloviyami* [Open pit mining technologies for mineral deposits in complex mining and geological conditions]. Novosibirsk: Geo, 2013, 307 p. (In Russ.)
24. Drankova N.A., Denisova Ya.V. Problems of efficiency of the quality management system and ways to solve them in the new economic environment. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023;21(1):65-73. (In Russ.)
25. Freidina E.V., Botvinnik A.A., Dvornikova A.N. *Sistemnoe upravlenie kachestvom ugley pri otkrytoy razrabotke mestorozhdeniy Sibiri* [Systematic management of the coal quality in open-pit mining in Siberia]. Novosibirsk: Nauka, 2019, 264 p. (In Russ.)
26. Maiorova T.V., Ponomareva O.S., Pavlova I.E. Sustainable development of metallurgical enterprises: Aspects, criteria, indicators. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022;20(2):140-147. (In Russ.)
27. Shupletsov A.F., Zhang Yanjie. China's Inner Mongolia cluster for diversified processing of brown coal. *Baikal Research Journal*. 2021;12(1). (In Russ.)
28. Khoreshok A.A., Litvin O.I., Dubinkin D.M., Markov S.O., Tyulenev M.A. Synergetic approach to solving geo-environmental problems of coal mining and coal processing subclusters. *Ugol* [Coal]. 2022;(12):82-87. (In Russ.)
29. Krasnyansky G.L. Development strategy of the Karakan coal and energy cluster. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin]. 2015;(S1):649-653. (In Russ.)

Поступила 26.07.2023; принята к публикации 13.10.2023; опубликована 25.12.2023
Submitted 26/07/2023; revised 13/10/2023; published 25/12/2023

Ческидов Владимир Иванович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник,
Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, Новосибирск, Россия.
Email: cheskid@misd.ru. ORCID 0000-0001-5584-7821

Гаврилов Владимир Леонидович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник,
Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, Новосибирск, Россия.
Email: gvlugorsk@mail.ru. ORCID 0000-0002-2401-455X

Резник Александр Владиславович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, Новосибирск, Россия.
Email: a-reznik@mail.ru. ORCID 0000-0002-0077-3404

Немова Наталья Анатольевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, Новосибирск, Россия.
Email: nemova-nataly@mail.ru. ORCID 0000-0002-5050-611X

Vladimir I. Cheskidov – PhD (Eng.), Lead Researcher,
Chinakal Institute of Mining, SB, RAS, Novosibirsk, Russia.
Email: cheskid@misd.ru. ORCID 0000-0001-5584-7821

Vladimir L. Gavrilov – PhD (Eng.), Lead Researcher,
Chinakal Institute of Mining, SB, RAS, Novosibirsk, Russia.
Email: gvlugorsk@mail.ru. ORCID 0000-0002-2401-455X

Aleksandr V. Reznik – PhD (Eng.), Senior Researcher,
Chinakal Institute of Mining, SB, RAS, Novosibirsk, Russia.
Email: a-reznik@mail.ru. ORCID 0000-0002-0077-3404

Natalia A. Nemova – PhD (Eng.), Senior Researcher,
Chinakal Institute of Mining, SB, RAS, Novosibirsk, Russia.
Email: nemova-nataly@mail.ru. ORCID 0000-0002-5050-611X



ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ СМЕСЕЙ ЛИТЕЙНЫХ ФОРМ

Андреев С.М.¹, Колокольцев М.В.², Савинов Д.А.³, Дубровин В.К.⁴, Петроченко Е.В.¹

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

² Проектная школа «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия

³ Средняя общеобразовательная школа №5 с углубленным изучением математики, Магнитогорск, Россия

⁴ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Основной целью данной работы является исследование использования моделей искусственной нейронной сети (ИНС) для проверки и прогнозирования прочностных свойств сухих и влажных песчано-глинистых смесей, используемых для формовки в процессах изготовления литых изделий. В качестве основного параметра, выражающего прочностные свойства песчано-глинистых смесей, использовали сопротивление деформации формы. В качестве выбранной структуры ИНС использовали персептрон с несколькими скрытыми слоями, в качестве метода обучения применяли метод с учителем с использованием экспериментальных данных. Определение синаптических весов производили с использованием базового алгоритма обратного распространения ошибки. Исследовали время обучения и результирующую точность ИНС для предсказания прочностного параметра песчано-глинистых смесей в зависимости от состава смеси, влажности и температуры. В результате исследования была сформирована структура персептрона нейросетевой модели и определены значения величин синаптических весов. Реализующая разработанную нейросетевую модель программа для ЭВМ позволила выполнить прогнозирование количественного влияния отдельных компонентов сырых и сухих песчано-глинистых смесей на их предел прочности на сжатие, который выражается через сопротивление деформации. Полученные результаты прогнозирования характеристик сравнивались с экспериментально полученными результатами других исследователей. Было установлено, что расчетные прогнозируемые данные по влиянию компонентного состава смеси на сопротивление деформации не противоречат экспериментальным данным. Исследования, проведенные с использованием разработанного программного обеспечения, позволили выполнить оценку прочности формовочных смесей с компонентными составами, которые ранее не исследовались. Это позволит расширить диапазоны оценки возможности образования горячих трещин в отливках.

Ключевые слова: песчано-глинистая форма, искусственная нейронная сеть, формовочная смесь, компонентный состав, податливость формы, моделирование напряженного состояния, нейросетевая модель

© Андреев С.М., Колокольцев М.В., Савинов Д.А., Дубровин В.К., Петроченко Е.В., 2023

Для цитирования

Использование искусственных нейронных сетей для прогнозирования прочностных свойств песчано-глинистых смесей литейных форм / Андреев С.М., Колокольцев М.В., Савинов Д.А., Дубровин В.К., Петроченко Е.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №4. С. 23-33. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-23-33>



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

THE USAGE OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS FOR PREDICTING STRENGTH PROPERTIES OF SAND-CLAY MIXTURES FOR CASTING MOLDS

Andreev S.M.¹, Kolokoltsev M.V.², Savinov D.A.³, Dubrovin V.K.⁴, Petrochenko E.V.¹

¹ Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

² Project School of Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

³ General Secondary School No. 5 with Advanced Study of Mathematics, Magnitogorsk, Russia

⁴ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. This research is mainly aimed at studying the usage of artificial neural network (ANN) models for testing and predicting strength properties of dry and wet sand-clay mixtures used for molding in manufacturing the cast products. Deformation resistance of the mold was used as the main parameter expressing strength properties of sand-clay mixtures. A perceptron with multiple hidden layers was used as the chosen ANN structure, and a supervised method using experimental data was applied as the training method. Synaptic weights were determined using a basic error backpropagation algorithm. Training time and the resulting accuracy of ANN were studied to predict the strength parameter of sand-clay mixtures depending on the mixture composition, moisture and temperature. The result of the study is a formed structure of the perceptron of the neural network model and determined values of synaptic weights. A computer program, using the developed neural network model, predicted the quantitative effect of individual components of wet and dry sand-clay mixtures on their ultimate compressive strength expressed with deformation resistance. The obtained parameter prediction results were compared with the experimental results received by other researchers. It has been established that the calculated predicted data regarding the effect of a mixture composition on deformation resistance are not in conflict with the experimental data. The studies conducted with the application of the developed software contributed to the assessment of strength of molding sands, having compositions that have not been studied yet. This will expand ranges of assessment of potential hot cracking in castings.

Keywords: sand-clay mold, artificial neural network, molding sand, component composition, mold compliance, stress state modeling, neural network model

For citation

Andreev S.M., Kolokoltsev M.V., Savinov D.A., Dubrovin V.K., Petrochenko E.V. The Usage of Artificial Neural Networks for Predicting Strength Properties of Sand-Clay Mixtures for Casting Molds. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 4, pp. 23-33. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-23-33>

Введение

При производстве литых изделий с использованием песчаных форм одной из важных характеристик формы является её способность деформироваться в горячем состоянии под действием давления со стороны отливки. Сама же форма воздействует на отливку и при этом деформируется. Способность формы деформироваться (податливость формы) определяет величину возникающих в отливке напряжений, а следовательно, влияет на вероятность разрушения отливки, которое представляет собой образование трещин в теле отливки в процессе её кристаллизации и охлаждения [1]. Такой вид разрушения материала отливки носит название «горячая трещина». Горячие трещины, возникшие внутри отливки и не вышедшие на поверхность, приводят в дальнейшем к снижению прочностных свойств металла [2].

Основным параметром, который влияет на податливость формы, является её компонентный состав, а также распределение влажности по толщине формы, которая возникает за счет движения пара, образовав-

шегося из влаги под действием теплового поля горячей отливки с последующей его конденсацией в холодных слоях формы [3].

Моделирование напряженного состояния литейной формы представлено в работах [4, 5], в которых проводили исследования по влиянию компонентного состава формовочных смесей на их свойства с учетом температуры. Подобные исследования проводились и в работах [6, 7], в которых производились эксперименты по сжатию сырых и сухих формовочных смесей различного компонентного состава и контроль момента их разрушения. Результатом этих работ являлось подтверждение гипотезы по механизму разрушения формовочных смесей при различных состояниях. В работах [7-9], в отличие от предыдущих работ, испытание упругих и упругопластических свойств образцов формовочной смеси проводилось в условиях, когда боковые поверхности образца были ограничены. Предложенные авторами условия испытаний приближены к реальным условиям работы формы, так как учитывается действие опоки, которая оказывает на форму дополнительное и всестороннее сжатие. Пока-

зано, что из-за этого дополнительного действия опоки на форму прочность смеси формы значительно выше, чем прочность образцов, на которые не оказывалось ограничение боковых поверхностей.

Полученные результаты по прочности смесей [4-9] основываются на экспериментальных исследованиях смеси в разных условиях и при различном приложении нагрузки. Другим направлением исследования является теоретическое представление движения отдельных песчинок в песчано-глинистой форме, связанных между собой упругим материалом [10-14]. Такой подход позволил разделить поведение материала формы при сжатии на периоды [10] и было выделено три периода. В каждый период определялось поведение формы и исследовалось поведение отдельных песчинок в смеси. Первый период характеризуется поведением смеси как пластичного тела, которое легко поддается деформации от приложенного усилия. По мере действия силы сжатия происходит повышение плотности смеси, пустоты удаляются, смесь становится однородной. Отдельные песчинки начинают воздействовать друг на друга своими оболочками из связующего материала и начинается процесс деформации этих оболочек. Этот период характеризуется тем, что смесь ведет себя как вязко-упругое тело. При дальнейшем нагружении материала формы частицы песка начинают непосредственно взаимодействовать друг с другом, начинается их упругая деформация, а затем при превышении предела прочности и разрушение отдельных частиц. Поведение формовочной смеси становится подобным упруговязкопластичному телу, что приводит к проявлению упругих свойств. Описанный подход используется для разработки реологических моделей прогностического поведения формовочных смесей, что позволяет прогнозировать характеристики литейных форм и, соответственно, влиять на оказываемые на отливки напряжения [11].

Однако данный подход не позволяет учитывать в достаточной степени изменение механических и физических свойств формовочной смеси в процессе теплового воздействия на неё горячей отливки. Поэтому сформировался подход, в котором производится исследование процессов деформации формы при непосредственном взаимодействии отливки и формы в условиях, аналогичных условиям процесса литья в формы [12]. Например, в работе [13] описывается способ изучения неупругого перемещения слоев формовочной смеси с использованием лабораторного стенда, который представляет собой специально сконструированную литейную форму, на котором можно изучать неупругое перемещение слоев формовочной смеси. Такой подход позволил определить влияние начальных параметров формовочной смеси (до воздействия отливки) на податливость литейной формы при действии на неё горячей отливки и выразить это влияние значением модуля упругости. Кроме того, предложенная конструкция лабораторного стенда позволила наблюдать перемещение слоев в смеси под влиянием температуры отливки и получить эмпирические зависимости

этого влияния. Схожие исследования проводились авторами работы [14]. С использованием лабораторного стенда с литейной формой определялось численное значение податливости формовочной смеси, выраженное через сопротивление деформации при действии на неё горячей отливки в зависимости от плотности формы, начальной влажности, содержания бентонита и других факторов. Также авторами определялась прочность сырой формовочной смеси при сжатии и взаимосвязь этих параметров. По результатам эксперимента установлено, что взаимосвязь между прочностью и податливостью отсутствует, что не позволяет использовать данные лабораторных испытаний смесей на временное сопротивление сжатию для прогнозирования величины сопротивления деформации смеси.

В результате анализа информационных источников по прогнозированию податливости формы было установлено, что между сопротивлением деформации песчано-глинистых форм и её составом есть функциональная связь. Влажность, компонентный состав и начальная плотность формы являются основными параметрами, влияющими на податливость. Одним из факторов, затрудняющим установление этой связи и, как следствие, использование результатов исследований сопротивления сжатию формовочных смесей является отсутствие равномерного распределения температуры по толщине формы, нагреваемой от горячей отливки. Поэтому актуальной задачей является определение зависимостей, которые бы позволили прогнозировать величину податливости песчано-глинистой смеси в литейной форме в зависимости от компонентного состава, плотности, начальной влажности смеси и температуры отливки.

Для решения задач количественной оценки, в которых на выходную величину прогнозируемого значения параметра оказывает влияние несколько входных параметров, то есть когда требуется решение задачи многомерного анализа, показали хорошую эффективность методы глубокого обучения, в частности искусственные нейронные сети (ИНС). Такой подход к прогнозированию параметров различных материалов применяется в работах многих авторов [15-17].

В настоящем исследовании был использован подход с использованием ИНС для прогнозирования величины сопротивления деформации в зависимости от компонентного состава песчано-глинистых форм с различной начальной влажностью.

Было разработано программное обеспечение, в котором реализован персептрон и алгоритм обучения ИНС. Обучение ИНС было произведено на наборе экспериментальных данных, в которых в качестве входных параметров использовали значения содержания компонентов, таких как каолиновая и бентонитовая глина, а также величин плотности и влажности смеси. Для сырых смесей использовали в качестве входного параметра величину уплотнения смеси, а для сухих – величину деформации смеси. Выходным прогнозируемым параметром является сопротивление деформации смеси.

Используемые экспериментальные данные

Методика эксперимента, а также полученные экспериментальные данные по пределу прочности при сжатии сырых и сухих формовочных смесей приведены в работах [18-22].

Для сырых формовочных смесей проводили полный факторный эксперимент, в котором варьировался компонентный состав формовочных смесей и определялась деформационная способность слоя ПГС. Для сырых форм варьировали следующие параметры: процентное содержание связующих компонентов (бентонитовые и каолиновые глины) – 0, 5, 10%; влажность – 0, 2, 6, 10%; статическое нагружение 0-45 кН. В качестве наполнителя использовали кварцевый песок марки 1К202 (ГОСТ 2138-91). Для влажных формовочных смесей в ходе эксперимента для разных составов смесей контролировали начальный размер образцов и их начальную плотность $\rho_{вл}$.

Для сухих формовочных смесей проводился полный факторный эксперимент, в котором исследовали влияние компонентного состава и температурных условий нагружения на слой сухой ПГС. В процессе эксперимента варьировались следующие параметры: процентное содержание связующих компонентов – 0, 5, 10%; начальная влажность – 0, 2, 6, 10%; статическое нагружение на образец – 0-45 кН. Образцы сушили при температуре 250-300°C, охлаждали до 20°C и повторно нагревали до температуры 300, 600 и 900°C. В отличие от исследования сырых образцов смесей, для достаточной равномерности распределения температурного поля по сечению образца была уменьшена площадь его поперечного сечения.

Для определения деформационной способности материала форм испытываемые образцы подвергали статическому нагружению. Для этого смесь сжималась в обойме пуансоном и определялась величина статического нагружения до осадки, равной 10% от первоначальной высоты. Обойма позволяла исследовать образцы смесей как при полном отсутствии связующего, так и при влажности, превышающей 6%. При этом контролировали характеристику в координатах «усилие нагружения – изменение высоты образца». Затем

производили пересчёт полученной характеристики в координаты «усилие – относительная деформация». С целью исключения взаимовлияния двух факторов – плотности и влажности – производился пересчёт плотности без учета влажности.

Искусственная нейронная сеть

Искусственные нейронные сети (ИНС) используются для решения нелинейных сложных задач, в результате которых на основе работы алгоритма обучения определяется взаимосвязь между выходным и входными параметрами. В своей основе ИНС являются адаптивными экспериментально-статистическими моделями, в которых объект исследования представляется «черным ящиком», то есть процессом, о котором известны только входные и выходные параметры при полном отсутствии информации о внутренних взаимных связях между ними [22, 23].

Обучение нейронной сети заключается в выборе величины синаптических весов, характеризующих связь между нейронами таким образом, чтобы формируемые нейронной сетью выходные значения параметра, полученные расчетным путем, были наиболее близки к экспериментальным значениям. То есть при выборе синаптических весов необходимо стремиться к тому, чтобы нейронная сеть выдавала бы такие же результаты, которые были получены при проведении эксперимента. Оптимальные синаптические веса определяют функцию связи между выходным и входными переменными в нейросетевой модели.

В этом исследовании использовали персептрон, представляющий полносвязанную ИНС прямого распространения. На рис. 1 приведена структура персептрона, используемая для формирования модели. Число входов персептрона соответствует числу варьируемых параметров модели. Выходное значение персептрона, являющееся выходом нейросетевой модели, представляет собой величину сопротивления деформации исследуемой формовочной смеси. Кружками показаны нейроны слоев, а стрелочками – связи между ними с указанием направления распространения сигнала.

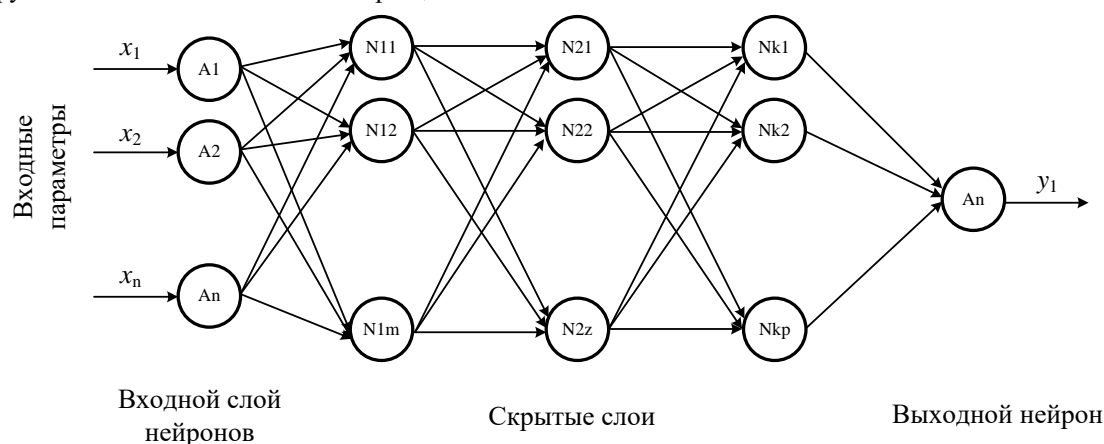


Рис. 1. Структура полносвязанной ИНС прямого распространения со скрытыми слоями

Fig. 1. Structure of a fully connected direct propagation ANN with hidden layers

В работе выполнено исследование по выбору числа скрытых слоев и числу нейронов в скрытом слое. Выбраны такие значения, которые позволяли наилучшим образом предсказать значения величины степени деформации с минимальной ошибкой.

Во входном слое ИНС производится нормирование входных сигналов x_i в диапазоне 0,1-0,9 в соответствии с выражением:

$$X_i = 0,1 + 0,8(x_i - X_{\min i})(X_{\max i} - X_{\min i}), \quad (1)$$

где $X_{\min i}$, $X_{\max i}$ – минимальное и максимальное значения i -го параметра во входном слое для всех значений исходных данных соответственно, техн. ед; x_i – варьируемый параметр модели, техн. ед.

В нейронах скрытого и выходного слоя производится функциональное преобразование сигнала. Структурная схема нейрона скрытого слоя показана на рис. 2.

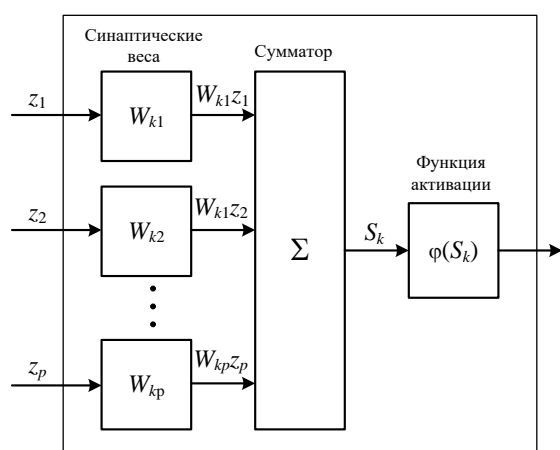


Рис. 2. Функциональная модель нейрона
Fig. 2. A functional model of a neuron

Входные значения сигналов z_i формируются в предыдущем (или во входном) слое нейронов. Каждый входной сигнал z_i масштабируется на величину синаптического веса W_{ki} и затем сигналы складываются в сумматоре. Выходной сигнал сумматора для k -го нейрона формируется в соответствии с выражением

$$S_k = \sum_{i=1}^p W_{ki} z_p. \quad (2)$$

Значение S_k с выхода сумматора подается на блок активационной функции, в котором происходит активация нейрона. В качестве активационной функции использовалась сигмоидальная функция вида

$$\varphi(S_k) = \frac{1}{1 + e^{-S_k}}. \quad (3)$$

Выходной сигнал нейрона передается на вход нейронов следующего слоя. Последним нейроном в этой последовательности вычислений является вы-

ходной нейрон. Кроме функции активации в выходном слое реализуется функция масштабирования сигнала на такую же величину, которая была использована при масштабировании экспериментальных значений величины относительной деформации в соответствии с выражением

$$y_1 = 1,25(Y_1 - 0,1)(Y_{\max} - Y_{\min}) + Y_{\min}, \quad (4)$$

где Y_{\min} , Y_{\max} – минимальное и максимальное значения выходного параметра модели; Y_1 – варьируемый параметр модели в диапазоне 0,1-0,9.

Диапазон варьируемого параметра (входного и выходного) был выбран от 0,1 до 0,9, чтобы избежать насыщения активационной функции нейрона.

В табл. 1 и 2 приведены значения параметров ИНС и диапазоны их изменения для прогнозирования свойств сухих и сырых формовочных смесей.

Таблица 1. Входные X и выходной y параметры ИНС для модели свойств сухой формовочной смеси

Table 1. Input X and output y parameters of ANN for the dry sand property model

Обозначение параметра	Параметр	Минимум	Максимум
x_1	Деформация, %	0,0	10,0
x_2	Плотность, г/см ³	1,3	1,6
x_3	Влажность, %	2,0	20,0
x_4	Бентонит, %	0,0	6,0
x_5	Каолин, %	0,0	6,0
x_6	Температура, °C	20,0	900,0
y	Сопротивление деформации, МПа	0,0	65,0

Таблица 2. Входные X и выходной y параметры ИНС для модели свойств сырой формовочной смеси

Table 2. Input X and output y parameters of ANN for the wet sand property model

Обозначение параметра	Параметр	Минимум	Максимум
x_1	Уплотнение, %	0,0	10,0
x_2	Плотность, г/см ³	1,3	1,6
x_3	Влажность, %	2,0	20,0
x_4	Бентонит, %	0,0	10,0
x_5	Каолин, %	0,0	10,0
y	Сопротивление деформации, МПа	0,0	16,0

Значение величин синаптических весов определяется в результате обучения ИНС на экспериментальных данных. Для обучения ИНС использовался алгоритм обратного распространения ошибки, в котором информация от входов ИНС к скрытому слою, а затем к выходу обрабатывается в прямом направлении, а затем производится обратное вычисление синаптических весов начиная с выходного нейрона, причем так, чтобы расчетные значения элементов выходного век-

тора слоя $Y = (y_1, y_2, \dots, y_p)$ были бы максимально близки к целевым выходным значениям $T = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p)$, полученным из экспериментальных данных. Для определения величины отклонения вектора Y от вектора T используется функция квадрата ошибки следующего вида:

$$\varepsilon = \sum_p \sum_k (y_i - \theta_i)^2, \quad (5)$$

где y_i – элемент выходного вектора Y ИНС; θ_i – элемент целевого выходного вектора T , полученного из экспериментальных данных.

Метод обратного распространения ошибки формирует величину градиента синаптических весов, который используется для изменения его величины в n -й эпохе обучения в соответствии с выражением

$$W_{ij}(n) = -\delta \frac{\partial \varepsilon}{\partial W_{ij}} + \alpha W_{ij}(n-1), \quad (6)$$

где δ – безразмерная величина скорости обучения, которая выбирается таким образом, чтобы процесс обучения был бы устойчивым и не останавливался при попадании в локальные минимумы; α – весовой коэффициент величины приращения синаптического веса за шаг.

Представленная модель ИНС с алгоритмом обратного распространения ошибки реализована на языке Pascal в среде разработки Borland Delphi 7.0.

Вычислительный эксперимент и результаты

Данные, полученные в результате экспериментов, были разбиты на 2 группы: обучающая выборка – 90% всех данных и тестовая выборка – 10% от всех данных. Модель ИНС формировалась с различным числом скрытых слоев (от 1 до 3) и различным числом нейронов в скрытом слое (от 10 до 100).

Из обучающей выборки входные данные (вектор X) последовательно подавались на входы ИНС и производился запуск алгоритма обратного распространения ошибки для выбора коэффициентов синаптических

весов W_{kp} . Однократная подстановка всех данных обучающей выборки заканчивала эпоху обучения. После этого цикл обучения повторялся. Обучение прекращалось, когда интегральный показатель ошибки обучения после окончания эпохи обучения не отличался более чем на 2% от интегрального показателя ошибки, полученной в предыдущей эпохе обучения. Интегральный показатель ошибки определялся как сумма квадратов отклонений расчетного значения $y_{\text{расч}}$ от экспериментального значения $y_{\text{экс}}$.

Для проверки качества обучения ИНС использовалась тестовая выборка, для которой определялись статистические показатели адекватности полученной модели ИНС с использованием критерия Фишера путем сравнения расчетной величины критерия F_p с критической F_k .

В результате проведенного вычислительного эксперимента были получены такие параметры ИНС (число скрытых слоев и число нейронов в скрытом слое), которые привели к наилучшему результату. Результаты исследований по выбору параметров нейросетевой модели по прогнозированию сопротивления деформации слоя формовочной смеси приведены в табл. 3.

Разработанную программу моделирования использовали для определения влияния различных факторов на сопротивление деформации слоя сырой и сухой формовочной смеси. При моделировании характеристик сырой ПГФ (рис. 3) величину влажности смеси при формовке принимали равной 5%, плотность 1,5 т/м³, содержание каолиновой глины 5%, а бентонитовой глины 3%. При анализе влияния связующих компонентов они рассматривались отдельно (рис. 3, б).

Установлено, что начальная плотность смеси влияет на сопротивление деформации сырой песчано-глинистой формы: чем выше начальная плотность, тем выше возникающие напряжения в слое смеси (рис. 3, в).

Определено неоднозначное влияние начальной влажности смеси на сопротивление деформации (рис. 3, а).

Таблица 3. Итоговые параметры нейросетевых моделей по прогнозированию сопротивления деформации слоя формовочной смеси

Table 3. Final parameters of neural network models for predicting deformation resistance of a sand layer

Характеристика	Количество нейронов в слое			Число эпох обучения	Объем тестовой выборки	Корреляционное отношение	Оценка адекватности
	1	2	3				
Сопротивление деформации слоя сухой ПГФ σ , МПа	95	47	31	108	717	0,997	$F_p < F_k$ 1,035 < 1,358
Сопротивление деформации слоя сырой ПГФ σ , МПа	51	–	–	12	121	0,9967	$F_p < F_k$ 1,006 < 1,358

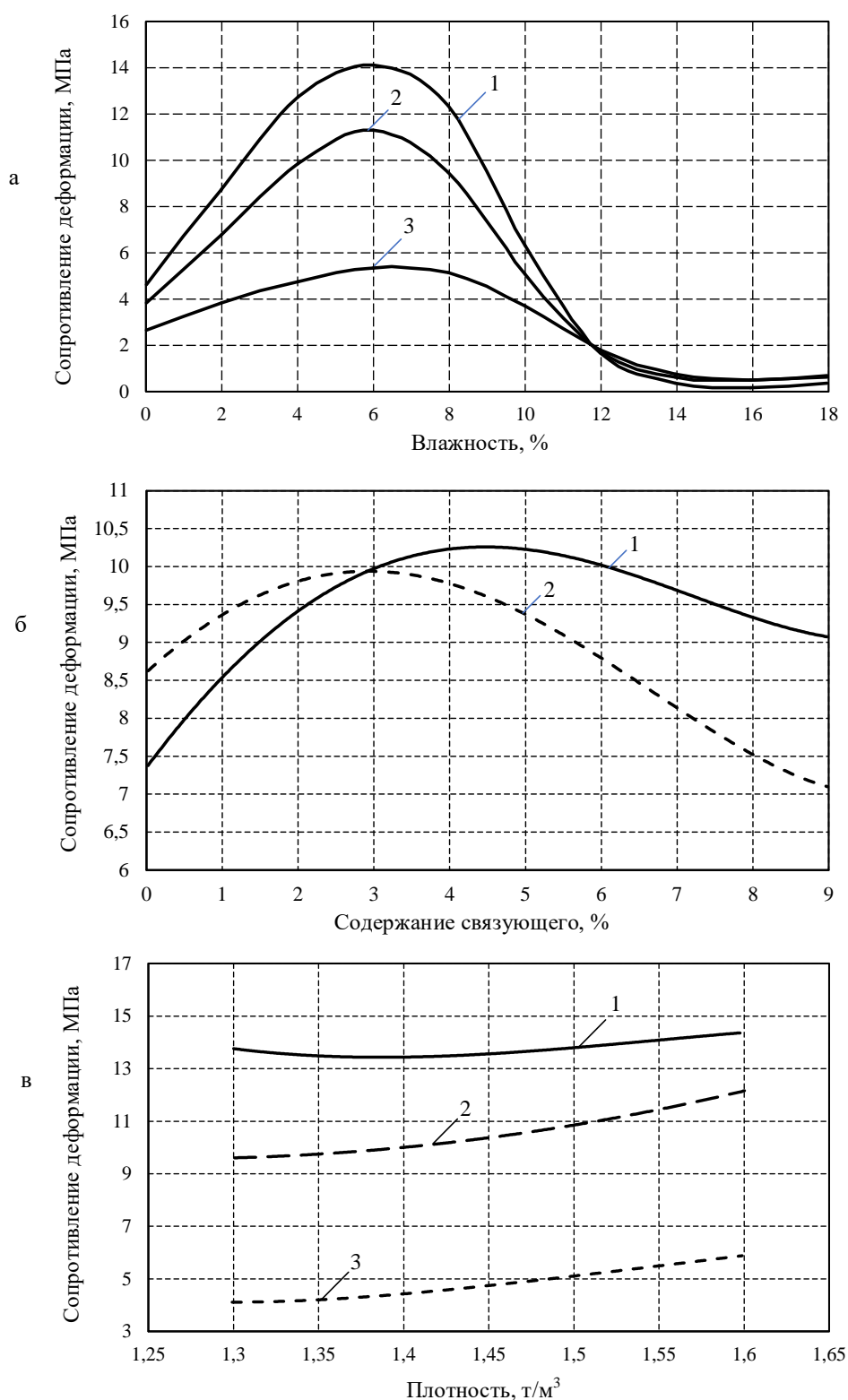
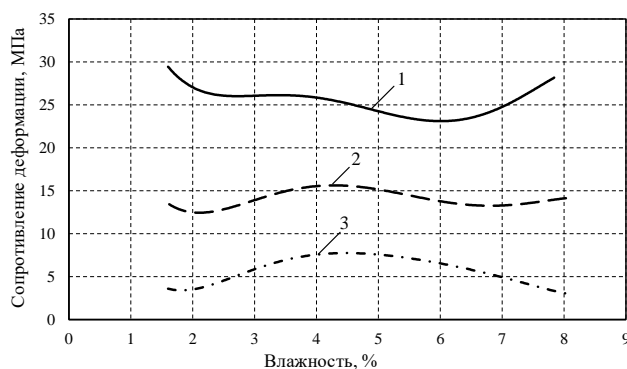


Рис. 3. Расчетные зависимости сопротивления деформации сырых песчано-глинистых смесей от:
а – влажности (1 при деформации 9%, 2 – 6%, 3 – 3%); б – содержания связующего (1 – бентонитовая глина, 2 – каолиновая глина); в – плотности $\rho_{\text{сух}}$ (1 – при деформации 9%, 2 – 6%, 3 – 3%)
Fig. 3. Calculated dependences between deformation resistance of wet sand-clay mixtures and: а is moisture (1 is at a deformation of 9%; 2 is 6%; 3 is 3%); б is binder content (1 is bentonite clay; 2 is kaolin clay); в is density ρ_{dry} (1 is at a deformation of 9%; 2 is 6%; 3 is 3%)

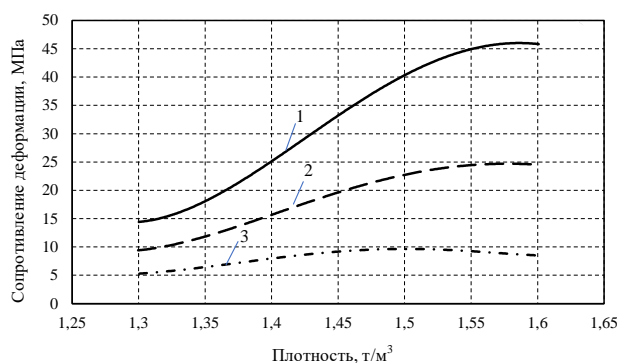
При значениях влажности до 4-6% сопротивление деформации значительно увеличивается при увеличении начальной влажности. Это объясняется тем, что связующие компоненты набирают прочность. При дальнейшем увеличении влажности до 14% наблюдается снижение величины деформации смеси, и при больших значениях влажности снижается практически до нуля. Обратный процесс наблюдается при изменении содержания связующих компонентов в смеси. При увеличении процентного содержания связующих происходит усвоение достаточной влаги и набора прочности, что приводит к увеличению величины сопротивления деформации (см. **рис. 3, б**). Когда связующего становится больше, чем доступной влаги, требуемой для набора прочности, прочность смеси начинает уменьшаться.

При исследовании сухих песчано-глинистых форм задавались следующими параметрами смеси при формовке. Величину влажности смеси принимали равной 5%, плотность смеси $1,4 \text{ т/м}^3$, температура 400°C , содержания каолиновой глины 5%, содержание бентонитовой глины 3%. Аналогично исследованиям сырых смесей при анализе влияния связующих компонентов они рассматривались отдельно, например как показано влияние на **рис. 4, б**.

Эксперимент с сухой смесью позволил определить



а

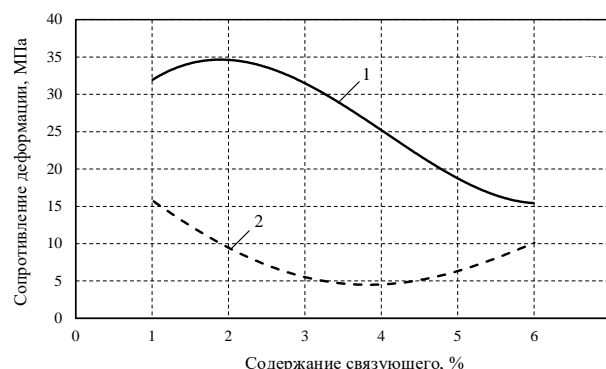


в

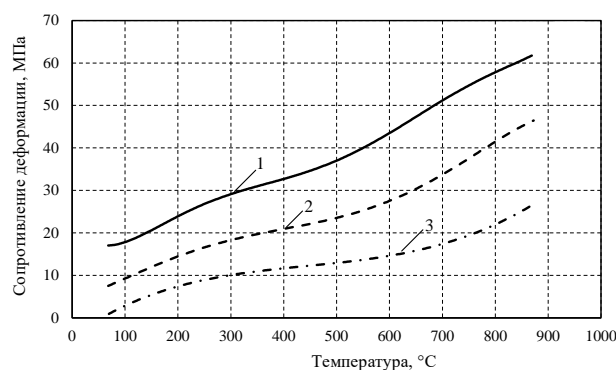
влияние температуры смеси ПГФ (**рис. 4, г**). Исследования показали, что увеличение температуры приводит к увеличению сопротивления деформации смеси. Аналогичное влияние оказывает и увеличение плотности песчано-глинистой формы (**рис. 4, в**).

Влияние содержания каолиновой глины носит существенно нелинейный характер. Как видно из полученных результатов (**рис. 4, б**), до содержания 2% происходит увеличение сопротивления деформации формовочной смеси, а при превышении этого порога – снижение. Причиной такого явления, так же как и для сырых форм, является недостаточное количество влаги в смеси для набора прочности большого количества связующего. Увеличение же количества бентонитовой глины в сухой форме, напротив, увеличивает податливость смеси, и только после превышения порога по её содержанию более 4% эффект повышения податливости (и снижения величины сопротивления деформации) перестает наблюдаться и происходит небольшое повышение прочности.

Полученные данные не противоречат физическому смыслу поведения изучаемого объекта, а также экспериментальным данным других исследователей [3-12], что может являться косвенным подтверждением адекватности полученной модели.



б



г

Рис. 4. Расчетные зависимости сопротивления деформации сухих песчано-глинистых смесей от: а – влажности при формовке (1 – осадка 9%, 2 – 6%, 3 – 3%); б – содержания связующего (1 – каолиновая глина, 2 – бентонитовая глина); в – плотности (1 – осадка 9%, 2 – 6%, 3 – 3%); г – температуры (1 – осадка 9%, 2 – 6%, 3 – 3%)

Fig. 4. Calculated dependences between deformation resistance of dry sand-clay mixtures and: a is moisture during molding (1 is a 9% sediment; 2 is 6%; 3 is 3%); б is binder content (1 is kaolin clay; 2 is bentonite clay); в is density (1 is a 9% sediment; 2 is 6%; 3 is 3%); г is temperature (1 is a 9% sediment; 2 is 6%; 3 is 3%)

Заключение

Подход с использованием нейросетевой модели был успешно применен для прогнозирования прочностных свойств песчано-глинистых смесей, в частности сопротивления деформации сухих и сырых ПГФ. Сравнение результатов с экспериментальными данными показало хорошую адекватность полученной модели. Кроме того, полученные результаты согласуются с экспериментальными наблюдениями других исследователей. В результате проведенного исследования можно сделать вывод, что ИНС являются полезным инструментом для определения влияния множества параметров на прочностные свойства песчано-глинистых смесей, а учитывая большой объем накопленных в отрасли экспериментальных данных по характеристикам ПГФ, могут быть успешно применены и для прогнозирования других параметров.

Список источников

- Бехалов В.Н. Механические свойства литейной формы при уплотнении прессованием // Литейное производство. 1965. №4. С. 18-21.
- Смеляков Н.Н., Косариков Н.Ф. Исправление пороков отливок. М.: Машгиз, 1950. 120 с.
- Савинов А.С., Тубольцева А.С. Расчет движения фронта влажности в сырой песчано-глинистой форме // Вестник Магнитогорского государственного университета им. Г.И. Носова. 2010. №2. С. 30-33.
- Савинов А.С. Методологические основы оценки и прогнозирования напряженно-деформированного состояния системы «отливка – форма» для предупреждения образования горячих трещин в фасонных отливках: дис. ... д-ра техн. наук. Магнитогорск, 2016. 382 с.
- Математическое моделирование напряженно-деформируемого состояния оболочковых форм при литье по выплавляемым моделям: монография / А.И. Евстигнеев, В.И. Одинокоев, В.В. Петров, Э.А. Дмитриев. Владивосток: Дальнаука, 2009. 130 с.
- Великанов Г.Ф., Примаков И.Н., Бречко А.А. Прочность формовочных смесей // Литейное производство. 1986. №3. С. 10-13.
- Мутилов В.П. Упругие свойства формовочной смеси // Литейное производство. 1974. №1. С. 30-31.
- Матвеев И.В., Иванов Е.И., Резчиков Е.А. Реологические испытания формовочных смесей // Формовочные смеси. 1977. №12. С. 11-14.
- Матвеев И.В., Иванов Е.И., Резчиков Е.А. Деформационные свойства формовочных смесей при сложном напряженном состоянии // Литейное производство. 1977. №10. С. 17-18.
- Карпенко В.М., Филипенко Е.В. Разработка экспериментального устройства для испытания деформационных свойств формовочной смеси // Вестник Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». Серия: Машиностроение. 2010. №58. С. 129-133.
- Моделирование реологических свойств формовочных смесей / В.П. Авдокушин, С.П. Дорошенко, Е.А. Сургучев и др. // Литейное производство. 1979. №8. С. 13-14.
- Изменение податливости сырой песчано-глинистой формы под воздействием геометрических и теплофизических свойств отливки / В.М. Колокольцев, А.С. Савинов, Н.А. Феоктистов, А.С. Постникова // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2020. Т. 63. №10. С. 829-835. DOI: 10.17073/0368-0797-2020-10-829-835
- Баландин Г.Ф., Степанов Ю.А. О силовом взаимодействии затвердевающей отливки и формы // Литейное производство. 1962. №4. С. 37-41.
- Аксенов П.Н., Трухов А.П. Прибор для испытания сырых формовочных смесей на горячую податливость // Литейное производство. 1979. №3. С. 20-21.
- Lin C-J, Wu N-J. An ANN Model for Predicting the Compressive Strength of Concrete // Applied Sciences. 2021, vol. 11, no. 9, pp. 3798.
- Predicting the compressive strength of ground granulated blast furnace slag concrete using artificial neural network / C. Bilim, C.D. Atiş, H. Tanyildizi, O. Karahan // Advances in Engineering Software. 2009, vol. 40, no. 5, pp. 334-340.
- Artificial neural network (ANN) prediction of compressive strength of VARTM processed polymer composites / A. Seyhan, G. Tayfur, M. Karakurt, M. Tanog // Computational Materials Science. 2005, vol. 1, no. 34, pp. 99-105.
- Савинов А.С., Тубольцева А.С., Синицкий Е.В. Исследование деформационной способности песчано-глинистых смесей // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. №1. С. 29-32.
- Савинов А.С., Тубольцева А.С. Расчет податливости сырой песчано-глинистой формы // Инновационные технологии в обеспечении качества, энергоэффективности и экологической безопасности. Повышение конкурентоспособности металлургических и машиностроительных предприятий в современных условиях. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2010. С. 176-179.
- Савинов А.С., Тубольцева А.С. Моделирование деформационной способности сухой песчано-глинистой формы // Прогрессивные технологии в современном машиностроении: сб. ст. VI Междунар. науч.-техн. конф. Пенза: Приволжский дом знаний, 2010. С. 66-70.
- Моделирование напряженного состояния сырых песчано-глинистых литейных форм / А.С. Савинов, В.П. Дзюба, К.А. Фролушкина, Р.М. Байбатыров; ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова». Магнитогорск, 2012. 10 с. Деп. в ВИНТИ 11.03.2012. №82. В2012.
- Исследование физических свойств сухих песчано-глинистых литейных форм // А.С. Савинов, А.С.

Тубольцева, В.П. Дзюба, К.А. Фролушкина; ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова». Магнитогорск, 2012. 41 с. Деп. в ВИНТИ 11.03.2012. №81. В2012.

23. Адаптивные статистические модели, синтезированные на основе ИНС / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, Т.Г. Обухова и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. №4(40). С. 68-71.
24. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс: пер. с англ., 2-е изд.: М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. 1104 с.

References

1. Bekhalov V.N. Mechanical properties of the casting mold during compaction by pressing. *Liteinoe proizvodstvo* [Foundry Production]. 1965;(4):18-21. (In Russ.)
2. Smelyakov N.N., Kosarikov N.F. *Ispravlenie porokov otlivok* [Correction of defects in castings]. Moscow: Mashgiz, 1950, 120 p. (In Russ.)
3. Savinov A.S., Tuboltseva A.S. Calculation of the movement of the moisture front edge in a wet sand-clay mold. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2010;(2):30-33. (In Russ.)
4. Savinov A.S. *Metodologicheskie osnovy otsenki i prognozirovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya sistemy «otlivka – forma» dlya preduprezhdeniya obrazovaniya goryachikh treshchin v fasonnykh otlivkakh: dis. ... dokt. tekhn. nauk* [A methodological framework for assessing and predicting the stress and strain state of the “casting – mold” system to prevent hot cracking in shaped castings. Doctoral dissertation]. Magnitogorsk, 2016. 382 p.
5. Evstigneev A.I., Odinov V.I., Petrov V.V., Dmitriev E.A. *Matematicheskoe modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya obolochkovykh form pri lite po vyplavlyаемым modelyam: monografiya* [Mathematical modeling of the stress and strain state of shell molds during investment casting: monograph]. Vladivostok: Dalnauka, 2009, 130 p. (In Russ.)
6. Velikanov G.F., Primak I.N., Brechko A.A. Strength of molding sands. *Liteinoe proizvodstvo* [Foundry Production]. 1986;(3):10-13. (In Russ.)
7. Mutilov V.P. Elastic properties of molding sands. *Liteinoe proizvodstvo* [Foundry Production]. 1974;(1):30-31. (In Russ.)
8. Matveenko I.V., Ivanov E.I., Rezchikov E.A. Rheological tests of molding sands. *Formovochnye smesi* [Molding Sands]. 1977;(12):11-14. (In Russ.)
9. Matveenko I.V., Ivanov E.I., Rezchikov E.A. Deformation properties of molding sands under complex stress state. *Liteinoe proizvodstvo* [Foundry Production]. 1977;(10):17-18. (In Russ.)
10. Karpenko V.M., Filipenko E.V. Development of an experimental device for testing the deformation properties of the molding sand. *Vestnik Natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta Ukrainy "Kievsky politekhnicheskyy institut. Seriya: Mashinostroyeniye* [Bulletin of National Technical University of Ukraine Kyiv Polytechnic Institute. Series: Mechanical Engineering]. 2010;(58):129-133. (In Russ.)
11. Avdokushin V.P., Doroshenko S.P., Surguchev E.A. et al. Modeling of rheological properties of molding sands. *Liteinoe proizvodstvo* [Foundry Production]. 1979;(8):13-14. (In Russ.)
12. Kolokoltsev V.M., Savinov A.S., Feoktistov N.A., Postnikova A.S. Change in ductility of a wet sand-clay mold under influence of geometric and thermophysical properties of the casting. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy]. 2020;63(10):829-835. (In Russ.) DOI: 10.17073/0368-0797-2020-10-829-835
13. Balandin G.F., Stepanov Yu.A. On the force interaction of a hardening casting and a mold. *Liteinoe proizvodstvo* [Foundry Production]. 1962;(4):37-41. (In Russ.)
14. Aksenov P.N., Trukhov A.P. A device for testing wet molding sands for hot compliance. *Liteinoe proizvodstvo* [Foundry Production]. 1979;(3):20-21. (In Russ.)
15. Lin C.-J., Wu N.-J. An ANN model for predicting the compressive strength of concrete. *Applied Sciences*. 2021;11(9):3798.
16. Bilim C., Atiş C.D., Tanyildizi H., Karahan O. Predicting the compressive strength of ground granulated blast furnace slag concrete using artificial neural network. *Advances in Engineering Software*. 2009;40(5):334-340.
17. Seyhan A., Tayfur G., Karakurt M., Tanog M. Artificial neural network (ANN) prediction of compressive strength of VARTM processed polymer composites. *Computational Materials Science*. 2005;1(34):99-105.
18. Savinov A.S., Tuboltseva A.S., Sinititsky E.V. Study on the deformation capacity of sand-clay mixtures. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2011;(1):29-32. (In Russ.)
19. Savinov A.S., Tuboltseva A.S. Calculation of the compliance of a wet sand-clay mold. *Innovatsionnye tekhnologii v obespechenii kachestva, energoэффективности i ekologicheskoy bezopasnosti. Povyshenie konkurentosposobnosti metallurgicheskikh i mashinostroyitelnykh predpriyatii v sovremennykh usloviyakh* [Innovative Technologies in Ensuring Quality, Energy Efficiency and Environmental Safety. Increasing Competitiveness of Metallurgical and Machine-Building Enterprises in Current Conditions]. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2010, pp. 176-179. (In Russ.)
20. Savinov A.S., Tuboltseva A.S. Simulation of deformation ability of dry sand-clay molds. *Progressivnye tekhnologii v sovremennom mashinostroyenii* [Progressive Technologies in Modern Mechanical Engineering: Collected Papers of the 6th International Scientific and Technical Conference]. Penza: Privolzhsky dom znaniy, 2010, pp. 66-70. (In Russ.)

21. Savinov A.S., Dziuba V.P., Frolushkina K.A., Baibaturov R.M. *Modelirovanie napryazhennogo sostoyaniya syrykh peschano-glinistyykh liteynykh form* [Modeling of the stress state of wet sand-clay casting molds]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2012, 10 p. (In Russ.)
22. Savinov A.S., Tuboltseva A.S., Dziuba V.P., Frolushkina K.A. *Issledovanie fizicheskikh svoystv sukhikh peschano-glinistyykh liteynykh form* [Study on the physical properties of dry sand-clay casting molds]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2012, 41 p. (In Russ.)
23. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Obukhova T.G. et al. Adaptive statistical models synthesized on the basis of artificial neural networks. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2012;4(40):68-71. (In Russ.)
24. Haykin S. *Neironnye seti: polny kurs* [Neural networks: A comprehensive foundation]. Moscow: Williams Publishing House, 2006, 1104 p. (In Russ.)

Поступила 05.06.2023; принята к публикации 29.06.2023; опубликована 25.12.2023
Submitted 05/06/2023; revised 29/06/2023; published 25/12/2023

Андреев Сергей Михайлович – доктор технических наук, заведующий кафедрой автоматизированных систем управления, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: andreev.acs@gmail.com. ORCID 0000-0003-0735-6723

Колокольцев Михаил Валерьевич – обучающийся проектной школы «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Email: mishakolokol@mail.ru.

Савинов Дмитрий Александрович – обучающийся МОУ «СОШ №5 с углубленным изучением математики», Магнитогорск, Россия. Email: savinov_es@mail.ru.

Дубровин Виталий Константинович – доктор технических наук, доцент кафедры пиromеталлургических и литейных технологий, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. Email: dubrovink@susu.ru.

Петроченко Елена Васильевна – доктор технических наук, профессор кафедры литейных процессов и материаловедения, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.

Sergey M. Andreev – DrSc (Eng.), Head of the Department of Automated Control Systems, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: andreev.acs@gmail.com. ORCID 0000-0003-0735-6723

Mikhail V. Kolokoltsev – student of NMSTU Project School, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: mishakolokol@mail.ru.

Dmitry A. Savinov – student of Secondary School No. 5, Magnitogorsk, Russia. Email: savinov_es@mail.ru.

Vitaly K. Dubrovin – DrSc (Eng.), Associate Professor of the Department of Pyrometallurgy and Foundry Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia. Email: dubrovink@susu.ru.

Elena V. Petrochenko – DrSc (Eng.), Professor of the Department of Foundry Processes and Materials Science, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ
MATERIAL PROCESS ENGINEERING

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

УДК 544.6

DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-4-34-43

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ЭЛЕКТРОЛИТОВ ДЛЯ ХРОМИРОВАНИЯ ТИТАНОВЫХ ДЕТАЛЕЙ

Груба О.Н., Ардашев Д.В., Дегтярева-Кашутина А.С.

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Электролитический хром обладает высокой коррозионной стойкостью, низким коэффициентом трения, высокой твердостью, жаростойкостью, высоким пределом текучести. Эти качества обеспечили процессу хромирования самое широкое применение во всех отраслях машиностроения. К специфическим отличиям процесса электролитического хромирования традиционно относят следующие: низкая рассеивающая способность электролитов хромирования и, как следствие, один из самых низких выходов металла по току, высокие плотности тока, высокая чувствительность процесса к режиму проведения процесса, необходимость применения нерастворимых анодов, использование токсичных соединений на основе шестивалентного хрома. В зависимости от условий проведения электролиза (температура электролита, плотность тока) можно получить осадки хрома, различные по своим физическим свойствам, главным образом по твердости и отражательной способности. Большое количество работ по электрохимическому хромированию относится к сталям, медным сплавам. В то же время перспективное направление хромирования поверхности титановых изделий изучено слабо. В настоящей работе предложены составы двух групп электролитов на основе соединений трех- и шестивалентного хрома в качестве базовых составов для исследования процессов электрохимического хромирования титановых изделий. Экспериментально определены величины плотности, вязкости, удельной электропроводности предложенных растворов. Выполнены вольтамперметрические исследования электрохимических процессов на титановом электроде в опытных электролитах. Установлено, что в изученных пределах изменения потенциалов титанового электрода процессы изменения валентного состояния хрома встречают существенные затруднения. Полученные результаты являются основой для более углубленной проработки вопроса о составе электролитов для электрохимического хромирования титановых изделий, экспериментального исследования особенностей кинетики осаждения хрома на титане методами экспериментальной электрохимии.

Ключевые слова: электролитическое хромирование, электролит, титан, вольтамперная характеристика

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 22-29-00418, <https://rscf.ru/project/22-29-00418>.

© Груба О.Н., Ардашев Д.В., Дегтярева-Кашутина А.С., 2023

Для цитирования

Груба О.Н., Ардашев Д.В., Дегтярева-Кашутина А.С. Исследование физико-химических свойств электролитов для хромирования титановых деталей // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №4. С. 34-43. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-34-43>



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

PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF ELECTROLYTES FOR CHROMIUM PLATING OF TITANIUM PARTS

Gruba O.N., Ardashev D.V., Degtyareva-Kashutina A.S.

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Electrolytic chromium has high corrosion resistance, low friction factor, high hardness, heat resistance, and high yield stress. The said properties contribute to the widest possible application of the electrolytic chromium plating process in all the branches of mechanical engineering. The peculiarities of the electrolytic chromium plating process conventionally include low dissipation capacity of electrolytes of chromium plating and, consequently, one of the lowest metal current yield, high current densities, high sensitivity of the process to the process mode, need for using insoluble anodes, and the use of toxic hexavalent chromium-based compounds. Depending on the electrolysis conditions (electrolyte temperature, current density), chromium precipitates can demonstrate different physical properties, mainly in hardness and reflectivity. A large number of studies on electrochemical chromium plating are attributed to steels and copper alloys. At the same time, the promising area of surface chromium plating of titanium products needs thorough research. This paper proposes the compositions of two groups of electrolytes based on trivalent and hexavalent chromium compounds as basic compositions for studying electrochemical chromium plating of titanium products. We experimentally determined the values of density, viscosity, specific conductivity of the proposed solutions. Voltammetric studies on electrochemical processes were performed on the titanium electrode in the experimental electrolytes. It has been found that in the studied limits of titanium electrode potential changes the processes of changing the valence state of chromium had significant difficulties. The results obtained are the basis for a more in-depth study on the composition of electrolytes for electrochemical chromium plating of titanium products. They can also help study the features of kinetics of the chromium deposition on titanium by means of experimental electrochemistry.

Keywords: electrolytic chromium plating, electrolyte, titanium, voltammetry characteristics

The research was supported by the grant of the Russian Science Foundation, No. 22-29-00418, <https://rscf.ru/project/22-29-00418>.

For citation

Gruba O.N., Ardashev D.V., Degtyareva-Kashutina A.S. Physical and Chemical Properties of Electrolytes for Chromium Plating of Titanium Parts. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 4, pp. 34-43. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-34-43>

Введение

Традиционно качество электрохимического покрытия (помимо состава электролита) регулируется условиями проведения процесса: температура электролита, плотность тока. Особенностью электролитического хромирования является исключительная чувствительность к режиму проведения электроосаждения. В связи с низкой рассеивающей способностью выход по току для процессов хромирования обычно составляет порядка 10-15%. Для сравнения: цинк в цианистом электролите дает 70% выхода по току, кадмий в цианистом электролите – 95%, цинк в кислом электролите – 100%. Наибольший выход по току в случае с хромом требует низких температур и высоких плотностей тока. Для восстановления металлического хрома из раствора электролита требуется ток в десятки раз большей плотности, чем для других металлов (железа, кадмия, никеля и др.). Для получения покрытия требуемого внешнего вида допустимое изменение температуры относительно выбранного режима составляет всего 1-2°C.

Теоретические исследования показали, что получить хромовый осадок, обладающий одновременно

максимальной твердостью и износостойкостью, невозможно. Это происходит из-за того, что на номограмме в координатах «плотность тока – температура электролита» области, отвечающие за образование наиболее твердых и наиболее износостойких блестящих покрытий, не пересекаются, а идут строго параллельно [1].

Электролиты хромирования принципиально делятся на две группы: на основе солей трехвалентного хрома (как и для большинства электролитов, применяемых в гальванотехнике) и на основе хромовой кислоты (точнее хромового ангидрида и серной кислоты). Более эффективными чаще всего оказываются электролиты из второй группы. Базовый «стандартный» электролит содержит 250 г/л хромового ангидрида и 2,5 г/л серной кислоты, то есть обычное соотношение реагентов 100:1. Однако низкий показатель pH приводит к высокой скорости катодного выделения водорода, что не может не сказываться на качестве осадка. Для повышения экономической целесообразности процесса хромирования, получения качественных покрытий с заданными физико-механическими свойствами исследователями постоянно предлагаются и изучаются различные модифицирующие неорганиче-

ские добавки: кремнесодержащие соединения [2], фториды [3], щелочи совместно с восстановителями.

Для получения твердых, устойчивых к истиранию покрытий предложен [1] так называемый сверхсульфатный электролит хромирования, обладающий более высокой рассеивающей способностью (выход по току составляет 20-25%) и стабильностью состава. Особенностью данного электролита является повышенное содержание серной кислоты (сульфат-анионов) – 12-25%. Осадки, полученные из сверхсульфатного электролита, обладают хорошей сцепляемостью с покрываемым металлом вследствие малых внутренних напряжений, несмотря на то что покрытия получаются не особо тонкие.

Необходимость постоянного контроля состава электролита для поддержания фиксированного соотношения между хромовым ангидридом и сульфат-анионами послужила причиной возникновения саморегулирующихся электролитов хромирования [1, 4]. Концентрация анионов серной кислоты на постоянном уровне поддерживается добавлением в систему малорастворимых сульфатов щелочноземельных и (или) 3d-металлов согласно принципу Ле Шателье-Брауна. Эти электролиты не требуют частой корректировки состава, позволяют применять высокие плотности тока ($150-200 \text{ А/дм}^2$) при относительно низких температурах ($18-23^\circ\text{C}$). Совокупность этих факторов позволяет получить качественные блестящие, износостойкие осадки, без снижения производительности процесса с выходом хрома по току 38-42%.

Одной из особенностей хрома, как типичного элемента VIB-группы в максимальной положительной степени окисления +6, является образование полихроматов. Превращение происходит последовательно при изменении кислотности раствора или при его концентрировании. Чаще всего в растворе содержится смесь хроматов различной степени полимеризации. Электролиты, основным хромсодержащим компонентами которых являются соединения тетрахроматного типа, получили название тетрахроматных. При использовании тетрахроматных электролитов на катоде высаживают тонкослойные, малопористые, пластичные, матовые осадки [5], легко подвергающиеся полировке. В качестве «улучшающих» присадок в тетрахроматные электролиты добавляют MgO или Na_2WO_4 [6]. Введение этих добавок позволяет увеличить твердость и обрабатываемость покрытия, повысить выход по току (35-40%), снизить чувствительность процесса к колебаниям температуры.

Для улучшения декоративных свойств хромовых покрытий – придания им блеска – предложен тетрахроматный электролит, содержащий кальцинированную соду и добавки гетероциклической циануровой кислоты (г/л) [4].

Электролиты хромирования из второй группы (на основе соединений, содержащих хром в степени окисления +3) несомненно обладают рядом преимуществ. Прежде всего это нетоксичность растворов. В

то время как Cr(III) служит пищевой добавкой, Cr(VI) и его соединения очень токсичны, провоцируя широкий спектр повреждений в клетках, в том числе и повреждение ДНК. Второй очень важный практический момент – процесс электровосстановления хрома – возможно проводить при более низких температурах [7, 8]. Однако соли Cr(III) (кроме нитрата) значительно менее растворимы в воде, получить однородный водный раствор возможно только в присутствии восстановителей. В ходе восстановления в прикатодном пространстве образуется плотная пленка из хроматов или гидроксидов хрома (II). Образование пленки тормозит процесс дальнейшего восстановления хрома. Повышение плотности тока не становится толчком к началу восстановления металла, а лишь вызывает бурное выделение водорода в прикатодном пространстве. Наводороживание покрытия вызывает ухудшение его физико-механических свойств. Чтобы исключить образование плотной непроводящей пленки, рядом исследователей [9] был предложен электролит, где в качестве растворителя выступала смесь диметилформамида (ДМФА) и воды.

Электролиты второй группы в своем составе содержат ионы хрома (III), связанные с различными анионами, как неорганическими (ClO_3^- , NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} и др.), так и органическими (HCOO^- , CH_3COO^- , $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$ и др.). Однако установлено [9], что именно ион SO_4^{2-} способен проникать через микропоры прикатодной пленки, постепенно растворяя ее. Таким образом, препятствие, мешающее дальнейшему восстановлению ионов хрома до свободного металла, устраняется. Кроме того, на тормозящее действие прикатодной пленки оказывает большое влияние природа самого катода. В частности, на меди и серебре такие пленки в принципе не образуются. К сожалению, исследования с титаном, обладающим естественной плотной оксидной пленкой, не проводились.

Последние десятилетия в качестве интенсифицирующей добавки в растворах хромовой кислоты часто используют различные органические компоненты [10], являющиеся источником углерода в составе покрытия. В этом случае фактически происходит электроосаждение сплава «хром-углерод», кинетика и механизм которого остаются практически неисследованными. Сложность теоретических исследований влияния органических добавок на скорость восстановления хрома объясняется тем, что хромовая кислота разрушает подавляющее большинство органических соединений за счет своей сильной окислительной способности.

Автор [9] предложил два новых состава электролитов на основе соединений шестивалентного хрома с добавками галловой кислоты и метиленового синего. Для первого состава оптимальная температура проведения процесса $45-55^\circ\text{C}$, для второго – $60-70^\circ\text{C}$. Предложенные присадки позволяют получать качественные покрытия при более высоких плотностях тока.

Улучшение свойств покрытий объясняют [11] особым воздействием органических веществ на состав, структуру и свойства прикатодной пленки электролита, образующейся в ходе электролиза. Добавки окисляются хромовой кислотой, образуя металлоорганические соединения с ионами Cr^{6+} (при этом процесса полимеризации не происходит), и этим способствуют увеличению выхода хрома по току.

В литературе приводятся результаты многочисленных экспериментальных исследований, посвященных нанесению хромовых покрытий на железо, никелевые и медные сплавы. Про титан такая информация практически отсутствует. Хромирование титана позволяет улучшить его механические параметры – износостойкость и термостойкость. Нанесение любого гальванического покрытия на титан, а также сплавы на его основе сопровождается дополнительными трудностями, так как на поверхности металла всегда имеется оксидная пленка переменного состава TiO_x . Детальные исследования пленки показали [12], что состав пленки не однороден, выделяют как минимум две фазы: верхний слой образован фазой TiO , под которой находится более протяженная область с фазовым составом, близким к TiO_2 . К особенностям этой сложной по составу пленки нужно отнести, во-первых, ее трудноудаляемость, во-вторых, способность легко восстанавливаться на воздухе и в различных растворах. Поэтому в работе была поставлена задача изучить электрохимическое поведение титановой детали (электрода) в модельных растворах шести- и трехвалентного хрома в режиме потенциодинамических исследований. Использованы две группы растворов электролитов хромирования – на основе солей трехвалентного хрома ($\text{KCr}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$) и хромового ангидрида CrO_3 (табл. 1).

Таблица 1. Составы модельных электролитов хромирования

Table 1. Compositions of model electrolytes for chromium plating

Вещество	Раствор				
	1	2	3	4	5
	Концентрация, моль/л				
$\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$	0,5	–	–	–	–
$\text{KCr}(\text{SO}_4)_2$	–	–	0,8	–	–
$\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$	0,186	0,2	0,15	–	–
Na_2SO_4	0,5	0,5	0,46	–	–
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	–	–	0,21	–	–
NaCl	–	0,07	–	–	–
CrCl_3	–	0,5	–	–	–
H_2SO_4	–	–	–	0,025	0,04
$\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$	–	–	–	–	0,11
CrO_3	–	–	–	2,5	4,0

Несмотря на многочисленные теоретические и экспериментальные исследования, до настоящего времени нет единой теории, позволяющей объяснить все особенности кинетики механизма процесса электрохимического восстановления хрома из растворов хромовой кислоты от +6 до 0. До сих пор остается открытым вопрос о том, как именно идет восстановление ионов хрома: через образование ионов с промежуточными степенями окисления или напрямую до свободного металла. Однако большинство исследователей сходится во мнении, что на поверхности электрода образуется плотная прикатодная пленка, состоящая из продуктов неполного восстановления ионов Cr^{6+} , затрудняющая процесс восстановления металла. Состав пленки динамично меняется во времени, ее состав и структура могут быть изменены воздействием активных анионов.

Материалы и методы исследования

Приготовление растворов электролитов и условия проведения процесса хромирования. Объектами исследования явились рабочие электроды, изготовленные из сплава на основе титана (BT8), модельные электролиты (см. табл. 1), содержащие соли трехвалентного хрома ($\text{KCr}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$, $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3$, CrCl_3), CrO_3 , анионы-активаторы и различные органические компоненты. Растворы готовились на основе дистиллированной воды и реактивов марки «х.ч.».

Электролиз проводили в стеклянных ячейках емкостью 0,1 л.

Физико-химические свойства растворов электролитов. В рамках данного исследования определялись следующие физико-химические свойства растворов модельных электролитов: плотность, вязкость и удельная электропроводность.

Методика определения плотности растворов. Для определения плотности использовали методику обратного гидростатического взвешивания. Суть метода заключается в определении потери в весе исследуемого тела, которую оно испытывает при погружении в жидкость. Эта потеря веса равна по закону Архимеда весу жидкости в объеме тела. В качестве образца (подвеса), погружаемого в исследуемые растворы, использовалась модель цилиндрической формы небольшого объема (около 0,5 см³). Образец был изготовлен из тефлона. Выбор материала определялся двумя параметрами. Во-первых, тефлон химически индифферентен к достаточно агрессивным кислотосодержащим электролитам, во-вторых, плотность материала незначительно отличается от определяемой (1,5-2,0 г/см³).

Расчет плотности раствора электролита d проводили по формуле

$$d = \frac{(m_0 - m_2)}{(m_0 - m_1)}, \quad (1)$$

где m_0 – масса сухого образца, г; m_1 – масса образца в дистиллированной воде (плотность воды приблизи-

тельно 1 г/см^3), g ; m_2 – масса образца в исследуемом электролите, $г$.

Методика определения вязкости растворов. Вязкость растворов определяли на приборе «Вискозиметр капиллярный стеклянный ВПЖ-3». Вискозиметры ВПЖ-3 предназначены для измерения вязкости прозрачных жидкостей в положительном интервале температур. Капиллярный вискозиметр работает по хронометрическому принципу. Как правило, вискозиметр представляет собой один или несколько соединенных капилляров с воронкой или узкой трубкой. Процесс измерения вязкости заключается в определении времени истечения жидкости из измерительного резервуара, с учётом перепада давления на концах капилляров (в случае определения кинематической вязкости – влияние силы притяжения земли). Диаметр капилляра 0,56 мм. Номинальное значение постоянной вискозиметра $K = 0,04637 \text{ мм}^2/\text{с}^2$.

Исследование производят в следующем порядке. Открываем стеклянный кран и через насадку, с помощью насоса Комовского, засасываем исследуемый раствор из химического стаканчика до заполнения насадки примерно наполовину. Затем закрываем кран. После выдерживаем прибор при заданной температуре (25°C), отделяем от вискозиметра насадку, стаканчик и измеряем время истечения жидкости между отметками M_1 – M_2 .

Вязкость жидкости η , $\text{мПа}\cdot\text{с}$, определяется по формуле

$$\eta = K \cdot t \cdot d, \quad (2)$$

где K – константа вискозиметра, $\text{мм}^2/\text{с}^2$; t – время истечения жидкости, $с$; d – плотность жидкости, г/см^3 .

Методика определения удельной электропроводности растворов. В данном исследовании устанавливалась зависимость удельной электропроводности растворов электролитов от их состава и температуры. В качестве измерительного оборудования использовали анализатор жидкости кондуктометрический лабораторный «Мультистест КСЛ-111» в комплекте с первичным преобразователем.

Электрохимические свойства растворов электролитов. Основной метод изучения механизма электроосаждения металлов – установление характера зависимости скорости электрохимической реакции от потенциала электрода.

Электрохимические исследования проводили на универсальном потенциостате-гальваностате IPC-PRO P-40X с помощью методов вольтамперометрии.

Элементарная ячейка для проведения электрохимических исследований состоит из стеклянной емкости (в нашем случае это химический стаканчик объемом 100 мл) с раствором электролита и системы электродов, присоединённых к источнику тока. Мы использовали трехэлектродную систему, состоящую из рабочего (исследуемого), вспомогательного электрода и электрода сравнения. Электроды погружают в раствор электролита, на них с помощью внешнего

источника подают поляризующее напряжение, равномерно меняющееся с заданной скоростью.

Для проверки работоспособности электрохимической ячейки были выполнены тестовые эксперименты с никелевым рабочим электродом в 0,05 М растворах гексацианоферратов (II, III) калия. Полученные результаты соответствуют известным литературным данным других исследований [10], что говорит о применимости использованной методики.

В работе были использованы два вольтамперометрических метода – прямая и циклическая вольтамперометрия. Прямая вольтамперометрия основана на фиксации тока при линейной развертке потенциала, подаваемого на стационарный рабочий электрод. Этот метод позволяет рассмотреть отдельно процессы окисления и восстановления. В циклических исследованиях фиксировалась зависимость протекающего через электрохимическую систему тока от времени. Параметры изменения напряжения (скорость изменения, пределы) задавались изначально. Верное определение диапазона изменения потенциала чрезвычайно важно: необходимо «поймать» нужные пики и отсеять пики, отвечающие за протекание побочных процессов, например пики, отвечающие электрохимическому окислению-восстановлению воды. Потенциал меняется циклично, плавно чередуя анодные и катодные области.

Результаты исследований

Учитывая, что структура и физико-химические свойства раствора электролита определяются свойствами его компонентов и продуктов их взаимодействия, была проведена сравнительная оценка таких характеристик растворов, как плотность и электропроводность.

Плотность электролитов хромирования. Для растворов плотность служит количественным отражением степени заполнения веществом полного объема системы. Это величина определяется между ионами, находящимися в растворе и молекулами растворителя: чем сильнее, напряженнее связи, тем плотнее «упаковка» и меньше плотность. Измерения плотности проводились при температуре 25°C . Исследовались две группы растворов: на основе соединений Cr^{3+} (модельные растворы 1-3) и соединений Cr^{6+} (модельные растворы 4 и 5). Результаты измерений приведены в табл. 2.

Первая группа растворов показывает значительно более низкие значения плотности. Сложный состав многокомпонентных электролитов хромирования существенно затрудняет проведение анализа явлений, протекающих в процессе электролиза. В зависимости от концентрации хромовой кислоты в растворе возникает ряд промежуточных динамических структур, в которых ионы хрома проявляют переменную валентность, образуются кислотные остатки ди-, три-, тетра- и других полихроматов [13]. Обычно в растворе обнаруживается смесь хроматов различной степени полимеризации [14]. За счет образования целого комплекса

полимерных структур вязкость и плотность растворов электролитов возрастает. Введение в раствор электролита сульфат-ионов приводит к смещению равновесия процесса полимеризации в сторону образования более устойчивых в этих условиях хромат-анионов.

Вязкость электролитов хромирования. Вязкость жидкости – это ее способность оказывать сопротивление перемещению одних частиц относительно других, то есть противостоять касательным усилиям в потоке. С точки зрения физики динамическая вязкость обозначает потерю давления за единицу времени. Согласно закону Стокса, величина вязкости обратно пропорциональна подвижности ионов в растворе, что, в свою очередь, определяет общую электропроводность системы. В работе были определены значения динамической вязкости растворов электролитов различного состава. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2. Плотность и вязкость модельных растворов
Table 2. Density and viscosity of model solutions

Номер раствора	1	2	3	4	5
d , г/мл	1,051	1,070	1,024	1,270	1,144
η , мПа·с	1,013	1,165	0,907	1,686	1,371

Электропроводность электролитов хромирования. Для технологического процесса существенное значение имеет удельная электропроводность раствора. От величины падения напряжения в электролите зависит расход электроэнергии ванны. Основные факторы, влияющие на электропроводимость, – состав электролита и его температура. Результаты эксперимента представлены на рис. 1.

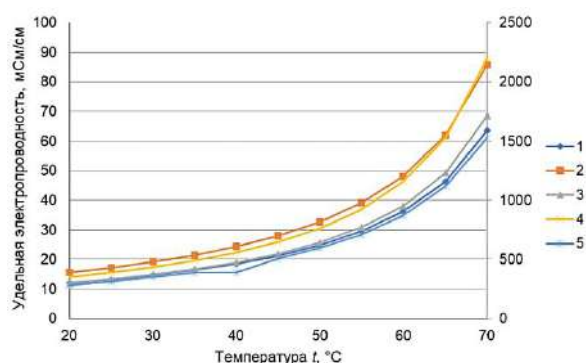


Рис. 1. Зависимость удельной электропроводности модельных электролитов хромирования от температуры: 1-3 – электролиты на основе соединений трёхвалентного хрома; 4, 5 – электролиты на основе соединений шестивалентного хрома

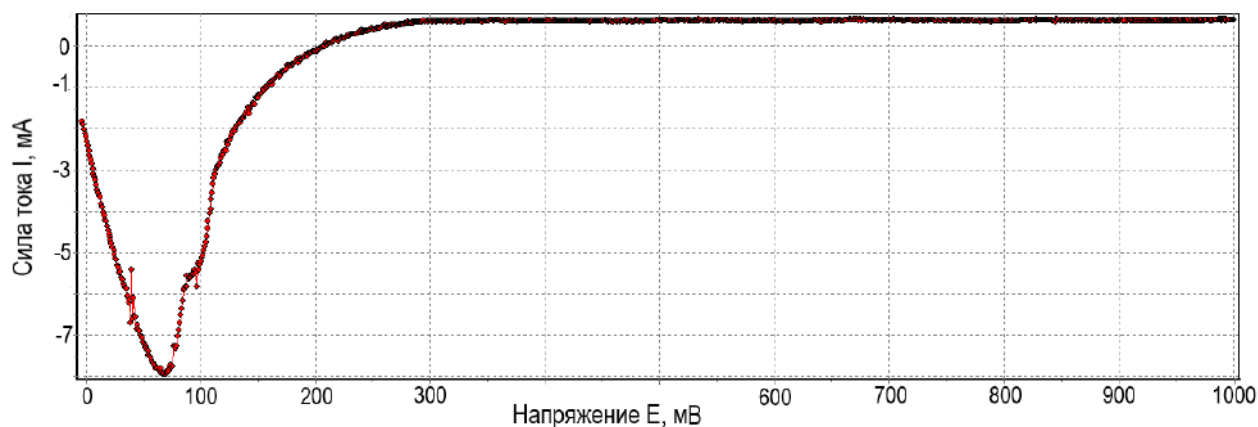
Fig. 1. Temperature dependence of specific conductivity of model electrolytes for chromium plating: 1-3 are electrolytes based on trivalent chromium compounds; 4, 5 are electrolytes based on hexavalent chromium compounds

Растворы, приготовленные на основе хромового ангидрида (линии 4, 5), демонстрируют значительно более высокие значения измеряемого параметра. Электропроводность растворов электролитов при повышении температуры ожидаемо увеличивается, что объясняется увеличением подвижности ионов за счет понижения вязкости раствора и уменьшения степени их сольватации. При этом характер изменения электропроводности в первой (линии 1-3) и второй (линии 4, 5) группах электролитов с ростом температуры сходный: при повышении температуры с 20 до 50°C удельная электропроводность возрастает в 2-2,1 раза, а в интервале температур 50-70°C возрастает в 2,6-2,9 раза.

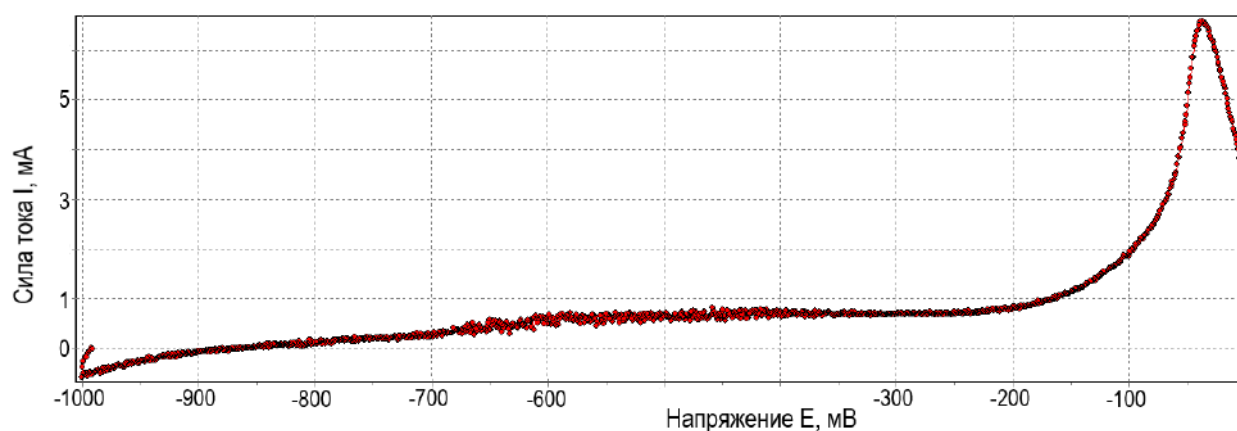
Анализ представленных выше результатов физико-химических исследований растворов электролитов хромирования позволяет дать косвенную информацию о структурных изменениях в растворах и оценить их качественные и количественные характеристики. Растворы на основе солей трехвалентного хрома позволяют получить экологически чистое покрытие, поскольку в электролитах не используются соли токсичного шестивалентного хрома, а сама технология относится к экологически чистой и не наносит вреда окружающей среде. В результате чего достигается низкая себестоимость очистки сточных промышленных вод от хрома. Растворы на основе хромового ангидрида не столь безукоризненны в экологическом плане, однако данная группа растворов обладает хорошими дисперсионными свойствами, позволяет достигать высокой катодной плотности тока, предоставляет возможность проводить процесс хромирования при более низкой температуре.

Электрохимические исследования. Классические закономерности катодного процесса, характерные для других электрохимических систем (форма ветвей, пики поляризационной кривой, их количество), совершенно меняются в случае с электролитами хромирования. Помимо этого, исследователи отмечают значительное торможение электрохимического процесса через короткий промежуток времени после включения. Причиной этого полагают образование на поверхности катода практически сразу после включения тока пленки продуктов неполного восстановления хромат-ионов. При выключении тока пленка растворяется и после повторного включения наблюдается снова скачок плотности тока и затем резкое ее снижение.

Для выявления особенностей катодного восстановления металла из водного раствора электролита были изучены поляризационные характеристики. Результаты электрохимических испытаний в виде линий прямых и циклических вольтамперограмм (ЦВА) для титанового электрода и опытных растворов представлены на рис. 2, 3. Для «привязки» пиков катодного восстановления к конкретным электрохимическим процессам растворы готовились и анализировались с постепенным усложнением состава.



а



б

Рис. 2. Прямые вольтамперограммы раствора электролита №1 (скорость развертки потенциала 10 мВ/с, рабочий электрод – титан, температура электролита 25°C): а – анодная ветвь; б – катодная ветвь

Fig. 2. Direct voltammograms of electrolyte solution No.1 (potential sweep rate is 10 mV/s, working electrode is titanium, and electrolyte temperature is 25 °C): a is an anodic branch, б is a cathodic branch

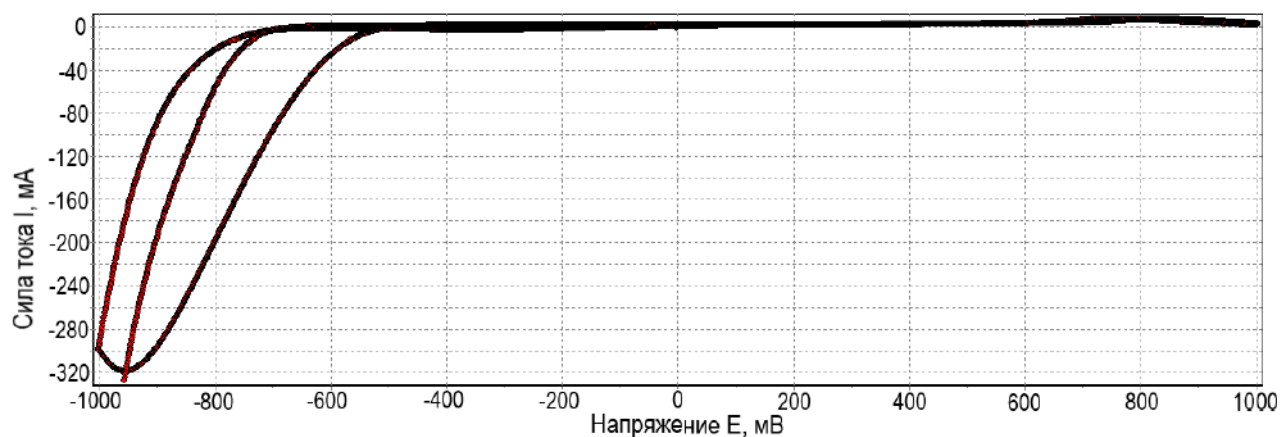


Рис. 3. Циклическая вольтамперограмма в растворе электролита №5 (скорость развертки потенциала 10 мВ/с, 10 циклов, рабочий электрод – титан, температура электролита 25°C)

Fig. 3. The cyclic voltammogram in electrolyte solution No. 5 (potential sweep rate is 10 mV/s, 10 cycles, working electrode is titanium, and electrolyte temperature is 25°C)

Электрохимические исследования проводили на универсальном потенциостате-гальваностате IPC-PRO P-40X с помощью метода вольтамперометрии. Потенциалы регистрировали относительно хлорсеребряного электрода сравнения ЭСр-10101 4,2 М, находящегося при той же температуре, что и рабочий электрод. Для повышения «укрываемости» титана проводилась предварительная активирующая подготовка поверхности электрода. Подготовка рабочих электродов заключалась в шлифовке и травлении поверхности пластины. Травление титана проводилось в концентрированной азотной кислоте (65%) при температуре 20-25°C в течение 40 мин.

Измерения проводились при температуре $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$, расстояния между электродами не более 2 см, скорость развертки 10-500 мВ/с, количество циклов – 10. Объем электролита на единицу поверхности составил 0,4 л/дм². Поляризационные кривые, снятые в указанных режимах, характеризуют скорость суммарного процесса и отражают совокупность всех протекающих на электроде реакций.

Для отработки методики исследования предварительно была проведена серия измерений с рабочими электродами из углеродистой стали (У8) и никеля в модельных растворах электролитов – в растворе сульфата хрома $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$ и растворе тетрахромата калия $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ с концентрацией 0,25 моль/л. В качестве электрода сравнения был выбран насыщенный хлорсеребряный электрод (+0,220 В относительно потенциала стандартного водородного электрода) [15].

Для растворов на основе трехвалентного хрома сняты прямые вольтамперограммы при поляризации титанового электрода в анодную (от 0 до 1 В) и катодную (от 0 до – 1 В) сторону. Результаты представлены на **рис. 3**. Оказалось, что в исследованном диапазоне потенциалов химических процессов, связанных с изменением степени окисления трехвалентного хрома, на титановом электроде не наблюдается. Небольшие по величине токи вблизи от начала развертки вероятно связаны с формированием двойного электрического слоя на поверхности электрода. Экспериментальные данные показывают, что кривые, характеризующие зависимость скорости восстановления ионов водорода от потенциала электрода, практически не зависят от присутствия активного аниона (SO_4^{2-}) в электролите. Сформировавшаяся катодная пленка, состоящая из гидратированных продуктов частичного восстановления ионов Cr^{+6} , создает дополнительное сопротивление на поверхности катода. Это приводит к росту потенциала до значений, при которых уже возможно восстановление хрома до металла.

Для растворов на основе шестивалентного хрома были сняты циклические вольтамперограммы в том же диапазоне изменения потенциала (от -1 до +1 В). Результаты приведены на **рис. 3**. При малых концентрациях ионов SO_4^{2-} (как это и соответствует литературным сведениям [16]) шестивалентный хром не восстанавливается, а увеличение катодного тока при потенциалах -0,6 – -0,7 В соответствует выделению водорода.

Таким образом, для выделения хрома на титановом электроде необходимо исследовать более отрицательные области потенциалов.

Заключение

По результатам литературного обзора установлено, что для процессов электрохимического осаждения хромовых покрытий применяется большое количество электролитов на основе соединений трех- и шестивалентного хрома с различными типами неорганических и органических добавок. Однако сведения об электролитах для осаждения хрома на титане не обнаружены.

Предложены две группы базовых составов электролитов на основе соединений трехвалентного и шестивалентного хрома как возможных электролитов для электрохимического осаждения хрома на титане. Экспериментально определены величины плотности, вязкости, удельной электропроводности предложенных растворов.

Выполнены вольтамперометрические исследования электрохимических процессов на титановом электроде в опытных электролитах. Установлено, что в изученных пределах изменения потенциалов титанового электрода процессы изменения валентного состояния хрома встречают существенные затруднения. Для обеспечения осаждения хрома на титане требуются более существенные отрицательные потенциалы электрода.

Список источников

1. Шлугер М.А. Гальванические покрытия в машиностроении. М.: Машиностроение, 1985. 240 с.
2. Покровская Г.А. Теория и практика хромирования. К.: КРДЭНТП, 1974. 103 с.
3. О взаимосвязи поляризационных характеристик и свойств фазовых пленок при хромировании во фторидсодержащем электролите / Невский О.И., Ратников С.В., Котов В.Л., Балмасов А.В. // Химия и химическая технология. 2007. Т. 50. Вып. 2. С. 45-47.
4. Молчанов В.Ф. Хромирование в саморегулирующихся электролитах. К.: Техника, 1972. 82 с.
5. Черкез М.Б., Богорад Л.Я. Хромирование. Л.: Машиностроение, 1978. 100 с.
6. Вейнер Р. Гальваническое хромирование / пер. с нем. И.Д. Груева и Е.В. Плассеева. М.: Машиностроение, 1964. 152 с.
7. Виноградов С.С. Экологически безопасное гальваническое производство. М.: Глобус, 2002. 352 с.
8. Окулов В.В. Экологические, технологические и экономические аспекты замены шестивалентных растворов хроматирования (пассивирования) // Гальванотехника и обработка поверхности. 2005. Т. 13. №2. С. 35-41.
9. Фомичев В.Т. Электроосаждение хрома из электролитов, содержащих органические добавки: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Новочеркасск: НГТУ, 1994. 34 с.

10. Фиошин М.Я., Томилов А.П. Некоторые проблемы современной электрохимии органических соединений (обзор) // Электрохимия. 1983. Т. 19. Вып. 1. С. 3-21.
11. Дасоян М.А., Пальмская И.Я. Оборудование цехов электрохимических покрытий. Л.: Машиностроение, 1979. 287 с.
12. Формирование оксидных пленок титана на поверхности пористого карбида кремния / Бачериков Ю.Ю., Дмитрук Н.Л., Конакова Р.В., Кондратенко О.С., Миленин В.В., Охрименко О.Б., Капитанчук Л.М., Светличный А.М., Москвиченко Н.Н. // Журнал технической физики. 2008. Т. 78. Вып. 9. С. 130-133.
13. Yunghans M. // Wasser, Luft und Boden. 1994, vol. 41, no. 3, p. 34.
14. Фаличева А.И., Бурдыкина Р.И. О механизме катодных процессов при хромировании из хроматных электролитов // Защита металлов. 1995. Т. 31. №2. С. 209-214.
15. Груба О.Н., Ардашев Д.В. Особенности электрохимического поведения металлических электродов в модельных растворах хромирования // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №3. С. 130-140.
16. Катодный процесс во время хромирования. Режим доступа: [<https://www.metalcutting.ru/content/katodnyy-process-vo-vremya-hromirovaniya>] (дата обращения 19.06.2023)
6. Weiner R. *Galvanicheskoe khromirovanie* [Galvanic chromium plating]. Moscow: Mashinostroenie, 1964, 152 p. (In Russ.)
7. Vinogradov S.S. *Ekologicheski bezopasnoe galvanicheskoe proizvodstvo* [Environmentally friendly electroplating]. Moscow: Globus, 2002, 352 p. (In Russ.)
8. Okulov V.V. Ecological, technological and economic aspects of replacing hexavalent solutions of chromating (passivation). *Galvanotekhnika i obrabotka poverkhnosti* [Electroplating and Surface Treatment]. 2005;13(2):35-41. (In Russ.)
9. Fomichev V.T. *Elektroosazhdenie khroma iz elektrolitov, sodержashchikh organicheskie dobavki: avtoreferat dis. ... doktora tekhnicheskikh nauk* [Electrodeposition of chromium from electrolytes containing organic additives: abstract of the thesis]. Novocherkassk: Novocherkassk State Technical University, 1994, 34 p.
10. Fioshin M.Ya., Tomilov A.P. Some issues of modern electrochemistry of organic compounds (review). *Elektrokhimiya* [Electrochemistry]. 1983;19(1):3-21. (In Russ.)
11. Dasoyan M.A., Palmskaya I.Ya. *Oborudovanie tsekhov elektrokhimicheskikh pokrytiy* [Equipment for electrochemical coating shops]. Leningrad: Mashinostroenie, 1979, 287 p. (In Russ.)
12. Bacherikov Yu.Yu., Dmitruk N.L., Konakova R.V., Kondratenko O.S., Milenin V.V., Okhimenko O.B., Kapitanchuk L.M., Svetlichny A.M., Moskvchenko N.N. Formation of titanium oxide films on the surface of porous silicon carbide. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Journal of Technical Physics]. 2008;78(9):130-133. (In Russ.)
13. Yunghans M. Wasser, Luft und Boden. 1994;41(3):34.
14. Falicheva A.I., Burdykina R.I. On the mechanism of cathodic processes during chromium plating from chromate electrolytes. *Zashchita metallov* [Protection of Metals]. 1995;31(2):209-214. (In Russ.)
15. Gruba O.N., Ardashev D.V. Features of the electrochemical behavior of metal electrodes in model solutions of chromium plating. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosov* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022;20(3):130-140. (In Russ.)
16. A cathodic process during chromium plating. Available at: <https://www.metalcutting.ru/content/katodnyy-process-vo-vremya-hromirovaniya>. (Accessed on June 19, 2023)

References

1. Shluger M.A. *Galvanicheskie pokrytiya v mashinostroenii* [Galvanic coatings in mechanical engineering]. Moscow: Mashinostroenie, 1985, 204 p. (In Russ.)
2. Pokrovskaya G.A. *Teoriya i praktika khromirovaniya* [Theory and practice of chromium plating]. Kyiv: KRDETP, 1974, 103 p. (In Russ.)
3. Nevsky O.I., Ratnikov S.V., Kotov V.L., Balmasov A.V. On the relationship between polarization characteristics and properties of phase films during chromium plating in a fluoride-containing electrolyte. *Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [Chemistry and Chemical Technology]. 2007;50(2):45-47. (In Russ.)
4. Molchanov V.F. *Khromirovanie v samoreguliruyushchikhsya elektrolitakh* [Chromium plating in self-regulating electrolytes]. Kyiv: Tekhnika, 1972, 82 p. (In Russ.)
5. Cherkez M.B., Bogorad L.Ya. *Khromirovanie* [Chromium plating]. Leningrad: Mashinostroenie, 1978, 100 p. (In Russ.)

Поступила 28.06.2023; принята к публикации 15.09.2023; опубликована 25.12.2023
Submitted 28/06/2023; revised 15/09/2023; published 25/12/2023

Груба Оксана Николаевна – кандидат химических наук, доцент,
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: grubaon@susu.ru. ORCID 0000-0003-4038-3766

Ардашев Дмитрий Валерьевич – доктор технических наук, доцент,
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: ardashevdy@susu.ru. ORCID 0000-0002-8134-2525

Дегтярева-Кашутина Анастасия Сергеевна – старший преподаватель,
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: degtiareva-kashutinaas@susu.ru. ORCID 0000-0003-1781-0395

Oksana N. Gruba – PhD (Chemistry), Associate Professor,
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: grubaon@susu.ru. ORCID 0000-0003-4038-3766

Dmitry V. Ardashev – DrSc (Eng.), Associate Professor,
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: ardashevdv@susu.ru. ORCID 0000-0002-8134-2525

Anastasia S. Degtyareva-Kashutina – Senior Lecturer,
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: degtiareva-kashutinaas@susu.ru. ORCID 0000-0003-1781-0395

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

УДК 621.99

DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-4-44-55



ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СОСТАВЛЯЮЩИХ СИЛЫ РЕЗАНИЯ ПРИ РЕЗЬБОФРЕЗЕРОВАНИИ

Мальков О.В., Карельский А.С.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Резьбофрезерование является гибким и универсальным способом обработки резьбы, обладающим рядом преимуществ, повышающим надежность и возможность автоматизации процесса резбонарезания. С переходом на станки с ЧПУ возросла и доля использования фрезерования резьб. Для повышения точности и качества резьбофрезерования необходимо прогнозировать силу резания, что позволит назначать обоснованные значения параметров инструмента и процесса резьбофрезерования. Существующие работы по резьбофрезерованию не позволяют с высокой точностью решить эту задачу в короткие сроки из-за упрощенного представления инструмента и проведения большого количества уточняющих экспериментов, а развитие инструментальных и обрабатываемых материалов требует увеличения объема проведения подобных работ, что требует разработки теоретической модели расчета силы резания при резьбофрезеровании. **Цель работы.** Разработать теоретическую модель для расчета составляющих силы резания при резьбофрезеровании однодисковой фрезой, что позволит оперативно производить расчет силы резания и проводить только подтверждающий расчетные значения эксперимент. **Используемые методы.** Теоретические исследования проведены с использованием основных положений теории резания материалов, аналитической геометрии. Геометрические модели выполнялись и проверялись при помощи программы Компас-3D. Расчеты проводились в программе PTC Mathcad Prime 3.1. **Новизна.** Предложенная в работе теоретическая модель силы резания учитывает сложную траекторию процесса фрезерования резьбы, геометрические параметры режущей части, сечение срезаемого слоя, механические свойства инструментального и обрабатываемого материала, износ инструмента и радиус округления режущей кромки, направление фрезерования. **Результат.** Работоспособность разработанной теоретической модели силы при резьбофрезеровании подтверждена экспериментальными данными, расхождение с которыми не превысило 15%. **Практическая значимость.** Предложенная теоретическая модель силы при резьбофрезеровании позволяет перейти к исследованию гребенчатых резьбовых фрез и решить такие задачи, как анализ конусности резьбы, исследование равномерности резьбофрезерования и управление амплитудой составляющих силы при резьбофрезеровании.

Ключевые слова: резьбофрезерование, резьбовая фреза, сила резания, моделирование, срезаемый слой

© Мальков О.В., Карельский А.С., 2023

Для цитирования

Мальков О.В., Карельский А.С. Теоретический расчет составляющих силы резания при резьбофрезеровании // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №4. С. 44-55. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-44-55>



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

THEORETICAL CALCULATION OF THE COMPONENTS OF THREAD MILLING CUTTING FORCES

Malkov O.V., Karelskiy A.S.

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). Thread milling is a flexible and versatile method of thread machining, which has a number of advantages, increasing reliability and the possibility of automating the threading process. The transition to CNC machines entailed an increase in a share of thread milling. To improve accuracy and quality of threading, it is necessary to predict cutting force to assign reasonable values of the parameters of the tool and the thread milling process. The existing studies on thread milling do not contribute to solving this problem with high accuracy in a short time due to the simplified representation of the tool and a large number of clarifying experiments, and the development of tool and machined materials requires an increase in the volume of such work, which requires the development of a theoretical model for calculating cutting force during thread milling. **Objectives.** To develop a theoretical model for calculating the components of cutting force, when threading with a single-disc milling cutter, to quickly calculate cutting force and conduct only an experiment confirming the calculated values. **Methods Applied.** Theoretical studies were carried out using the basic provisions of the theory of cutting materials and analytical geometry. Geometric models were performed and tested using Kompas-3D software. Calculations were carried out in PTC Mathcad Prime 3.1. **Originality.** A theoretical model of cutting force proposed in the paper factors into the complex trajectory of the thread milling process, the geometric parameters of the cutting part, the section of the cut layer, the mechanical properties of tool and machined materials, tool wear and the corner radius of the cutting edge, and the direction of milling. **Result.** Operability of the developed theoretical model of force during thread milling was confirmed by experimental data, the discrepancy with which did not exceed 15%. **Practical Relevance.** The proposed theoretical model of force during thread milling is used to proceed to the study on multiple-thread cutters and solve such problems as the analysis of the taper of the thread, the study on the uniformity of thread milling and control of the amplitude of the force components during thread milling.

Keywords: thread milling, thread mill, cutting force, modeling, cut layer

For citation

Malkov O.V., Karelskiy A.S. Theoretical Calculation of the Components of Thread Milling Cutting Forces. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 4, pp. 44-55. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-44-55>

Введение

Современное производство требует использования способов обработки, обеспечивающих высокую надежность, точность и качество продукции. Этим условиям удовлетворяет процесс резьбофрезерования, который является надежным, производительным, гибким и универсальным способом обработки резьбы и позволяет автоматизировать обработку широкого класса корпусных деталей на станках с ЧПУ, обеспечивая высокую точность и качество обработки.

Исследования в области резьбофрезерования, в основном, проводятся в направлении геометрического моделирования и оценки точности резьбы (в большинстве случаев метрической) и ограничено в области исследования силы резания [1-7]. Использование новых материалов, в особенности труднообрабатываемых, требует оценки их обрабатываемости и назначения параметров резьбовых фрез и режима обработки на основе информативных параметров, одним из которых является сила резания. Теоретическая модель силы резания при резьбофрезеровании дает возможность прогнозировать силу, возникающую при обработке, что позволяет без проведения экспериментов оцени-

вать состояние режущего инструмента при обработке, качество и точность резьбы, проводить оптимизацию геометрических параметров инструмента, расчет приводов оборудования и энергопотребления.

Укрупненно разработку моделей силы при резьбофрезеровании можно разделить на следующие направления: разработка эмпирических моделей (например, [1, 5]), требующих проведения дорогостоящих экспериментов и ограниченных начальными условиями теоретических моделей (например, [3, 7]), использование которых требует сложных вычислений, и теоретико-экспериментальных моделей [4, 6], которые требуют проведения ряда уточняющих экспериментов с последующим пересчетом под конкретные условия. Последний тип моделей наиболее широко распространен, однако такие модели разрабатываются упрощенными и не показывают полную картину процесса резания.

Таким образом, работа, направленная на получение теоретической модели силы резания при резьбофрезеровании, является актуальной, поскольку позволит отказать от трудоемких экспериментальных исследований и оперативно производить расчет силы резания.

Разработка теоретической модели силы резания однодисковой фрезой

Гребенчатая резбовая фреза представляет собой набор одинаковых дисковых элементов, имеющих резбообразующие профили, поэтому предложена концепция по выделению единичного дискового элемента и определения на нем составляющих силы резания, которая заключается в разбиении гребенчатой фрезы на ряд элементарных резбообразующих дисков, имеющих количество заточенных зубьев z , соответствующее количеству зубьев резбовой гребенчатой фрезы.

Каждый зуб полученного однодискового инструмента имеет резбообразующий профиль, состоящий из трех режущих лезвий, каждое из которых имеет разный передний угол γ и угол наклона режущих кромок λ . Наличие нескольких одновременно работающих лезвий является условием несвободного резания, а из-за разных углов наклона требуется описывать для каждой кромки условия косоугольного резания. Описывать резбофрезерование через модели косоугольного несвободного резания не представляется возможным из-за того, что на резбообразующем профиле нельзя выделить вспомогательные кромки, так как каждая совершает приближенно одинаковую работу. На основании этого использована модель по определению составляющих силы резания для резбового резца [8], который позволяет рассматривать каждую кромку на резце в условиях свободного косоугольного резания, а влияние других кромок учитывается в итоговых формулах. Использовать предложенную модель напрямую для работы резбовых фрез невозможно, поскольку она не учитывает изменение угла наклона на фаске резбообразующего профиля для винтового зуба гребенчатой резбовой фрезы, описывает условия точения с соблюдением постоянства сечения срезаемого слоя и не учитывает его изменение, в модели отсутствует понятие направления обработки (встречное или попутное).

На рис. 1 представлена схема расчета составляющих силы резания на режущей части однодисковой фрезы при попутном и встречном направлении обработки, в которой исходными геометрическими параметрами являются передний и задний углы в торцевом сечении зуба γ_t и α_t , угол наклона фаски резбообразующего профиля $\lambda_3 = \omega$ и углы резбообразующего профиля $\beta_1 = 90^\circ - \varphi_1$ и $\beta_2 = 90^\circ - \varphi_2$ (на рис. 1 углы β_1 и β_2 не указаны) на боковых лезвиях. Для метрической резбы принимаем углы резбообразующего профиля $\beta_1 = \beta_2 = 30^\circ$. Наличие угла ω изменяет фактические передние углы γ_1, γ_2 в главной секущей плоскости и добавляет углы наклона режущих кромок $\lambda_1, \lambda_2 \neq 0^\circ$, что приводит к появлению углов схода стружки η_1, η_2 на передней поверхности. При резбофрезеровании, из-за использования кинематической схемы, отличной от точения, а также наличия углов $\gamma_t, \lambda_1, \lambda_2$ углы в плане $\varphi_1 \neq \varphi_2 \neq 60^\circ$ и зависят от углов β_1 и β_2 . Причем при определенном сочетании углов γ_t и ω возможно изменение знака передних углов и углов наклона на боковых режущих кромках, что также приводит к изменению знаков и величин углов схода стружки на передней поверхности – η_1, η_2 . Наличие на фаске резбообразующего профиля угла $\lambda_3 = \omega \neq 0^\circ$ добавляет угол схода стружки η_3 , а также угол в плане φ_3 .

В исходных формулах [8] сила описывается для резца и используется ортогональная система распределения составляющих силы (P_x, P_y, P_z), которая является постоянной при точении. Однако при фрезеровании постоянно изменяется положение инструмента, поэтому необходимо совместить ортогональную систему с инструментом и перевести составляющие силы в касательную P_t , радиальную P_r и осевую P_z . На основании вышеописанного, исходная модель (см. рис. 1) была доработана с учетом изменения углов и показано распределение сил на каждой стороне профиля, а зависимости составляющих силы при резбофрезеровании с использованием модели [8] примут следующий вид:

$$\left\{ \begin{aligned} P_t &= N_3 \cdot \cos \gamma_{H3} \cdot \cos \omega + F_3 \cdot (\sin \eta_3 \cdot \sin \omega + \sin \gamma_{H3} \cdot \cos \eta_3 \cdot \cos \omega) + N_1 \cdot \cos \gamma_{H1} \cdot \cos \lambda_1 + \\ &+ F_1 \cdot (\sin \eta_1 \cdot \sin \lambda_1 + \sin \gamma_{H1} \cdot \cos \eta_1 \cdot \cos \lambda_1) + N_2 \cdot \cos \gamma_{H2} \cdot \cos \lambda_2 + \\ &+ F_2 \cdot (\sin \eta_2 \cdot \sin \lambda_2 + \sin \gamma_{H2} \cdot \cos \eta_2 \cdot \cos \lambda_2) + F'_1 + F'_2 + F'_3; \\ P_r &= F_3 \cdot \cos \gamma_{H3} \cdot \cos \eta_3 - \frac{N_3 \cdot \sin \gamma_{H3}}{\sqrt{1 - \cos^2 \gamma_{H3} \cdot \sin^2 \omega}} + N_1 \cdot (-\sin \gamma_{H1} \cdot \cos \varphi_1 + \cos \gamma_{H1} \cdot \sin \lambda_1 \cdot \sin \varphi_1) + \\ &+ F_1 \cdot (-\sin \eta_1 \cdot \cos \lambda_1 \cdot \sin \varphi_1 + \cos \gamma_{H1} \cdot \cos \eta_1 \cdot \cos \varphi_1 + \sin \gamma_{H1} \cdot \cos \eta_1 \cdot \sin \lambda_1 \cdot \sin \varphi_1) + \\ &+ N_2 \cdot (\sin \gamma_{H2} \cdot \cos \varphi_2 + \cos \gamma_{H2} \cdot \sin \lambda_2 \cdot \sin \varphi_2) + \\ &+ F_2 \cdot (-\sin \eta_2 \cdot \cos \lambda_2 \cdot \cos \varphi_2 + \cos \gamma_{H2} \cdot \cos \eta_2 \cdot \sin \varphi_2 + \sin \gamma_{H2} \cdot \cos \eta_2 \cdot \sin \lambda_2 \cdot \cos \varphi_2) + \\ &+ N'_3 + N'_1 \cdot \cos \varphi_1 + N'_2 \cdot \cos \varphi_2; \\ P_z &= N_3 \cdot \cos \gamma_{H3} \cdot \cos \omega - F_3 \cdot (\sin \eta_3 \cdot \cos \omega - \cos \eta_3 \cdot \sin \gamma_{H3} \cdot \sin \omega) - N_1 \cdot (\cos \gamma_{H1} \cdot \sin \lambda_1 \cdot \cos \varphi_1 + \sin \gamma_{H1} \cdot \sin \varphi_1) - \\ &- F_1 \cdot (\sin \gamma_{H1} \cdot \cos \eta_1 \cdot \sin \lambda_1 \cdot \cos \varphi_1 - \cos \gamma_{H1} \cdot \cos \eta_1 \cdot \sin \varphi_1 - \sin \eta_1 \cdot \cos \lambda_1 \cdot \cos \varphi_1) + \\ &+ N'_1 \cdot \sin \varphi_1 - N_2 \cdot (-\cos \gamma_{H2} \cdot \sin \lambda_2 \cdot \cos \varphi_2 - \sin \gamma_{H2} \cdot \sin \varphi_2) - \\ &- F_2 \cdot (-\sin \gamma_{H2} \cdot \cos \eta_2 \cdot \sin \lambda_2 \cdot \cos \varphi_2 + \cos \gamma_{H2} \cdot \cos \eta_2 \cdot \sin \varphi_2 + \sin \eta_2 \cdot \cos \lambda_2 \cdot \cos \varphi_2) - N'_2 \cdot \sin \varphi_2. \end{aligned} \right. \quad (1)$$

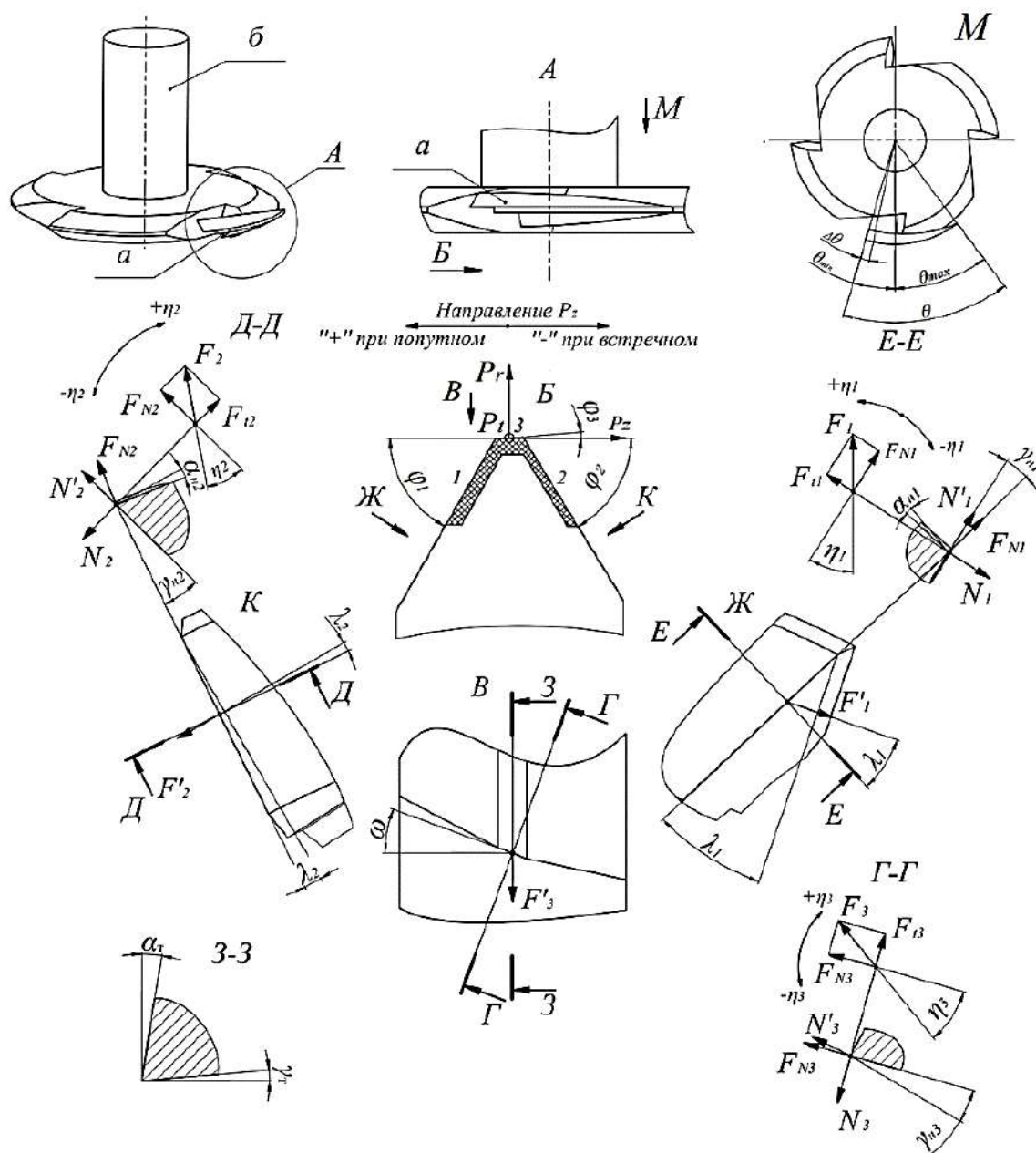


Рис. 1. Схема расчета составляющих силы резания на режущей части однодисковой резьбовой фрезы при попутном и встречном направлении обработки: а – срезаемый слой; б – фреза дисковая; 1, 2 – боковые стороны резьбообразующего профиля; 3 – фаска резьбообразующего профиля

Fig. 1. The calculation scheme of the components of cutting force on the cutting part of a single-disc thread mill with up and down milling: а is the cut layer, б is the disc mill; 1, 2 are the sides of the thread-forming profile, 3 is the chamfer of the thread-forming profile

Для наглядности отображения векторов касательных составляющих сил на передних поверхностях на боковых лезвиях F_1 и F_2 добавлены разложения этих векторов на нормальные $F_{N1,2}$ и касательные $F_{t1,2}$ составляющие (см. рис. 1).

Чтобы определить входящие в формулы (1) слагаемые усилия, необходимо определить расположение плоскости деформации стружки. Для косоугольного свободного резания угол между главной секу-

щей плоскостью и плоскостью деформации v_i определяется по следующей формуле [9]:

$$v_i = \arctg(\sin \lambda_i \cdot (1 - \operatorname{tg} \gamma_{Hi})). \quad (2)$$

Для определения угла схода стружки по передней поверхности η_i использовалась зависимость [9]:

$$\eta_i = \frac{(\sin \gamma_{Hi} \cdot \sin \lambda_i + \cos \gamma_{Hi} \cdot \operatorname{tg} v_i)}{\cos \lambda_i}. \quad (3)$$

Для определения геометрических параметров лезвия зуба инструмента на **рис. 2** показаны координатные плоскости в произвольной точке m (в соответствии с ГОСТ 25762-83) для расчета углов на примере лезвия 1 (см. **рис. 1**) резьбообразующего профиля. Аналогично определяются углы для кромок 2 и 3. Каждое лезвие профиля имеет переменные углы, связанные с радиальным затылованием задних поверхностей зуба и наличием винтовой передней поверхности, что усложняет расчет фактических значений углов на боковых сторонах профиля, поэтому они определялись с использованием касательных плоскостей в каждой точке кромок резьбообразующего профиля.

Для определения значений геометрических параметров лезвий резьбообразующего профиля однодисковой фрезы координатные плоскости были за-

даны уравнениями, а углы между плоскостями определялись при помощи методов аналитической геометрии. В **табл. 1** представлены полученные зависимости для определения геометрических параметров лезвий резьбообразующего профиля зуба однодисковой фрезы на всех трех его сторонах.

Для определения составляющих силы резания согласно (1) были рассмотрены теоретические модели определения силы резания. Использована последовательность расчета силы резания [10], которая показала наиболее близкие результаты к полученным экспериментальным данным в условиях малых значений толщины срезаемого слоя. Рассмотренная модель основывается на определении силы стружкообразования P_c (**рис. 3**), а основные формулы для расчета представлены в **табл. 2** [10].

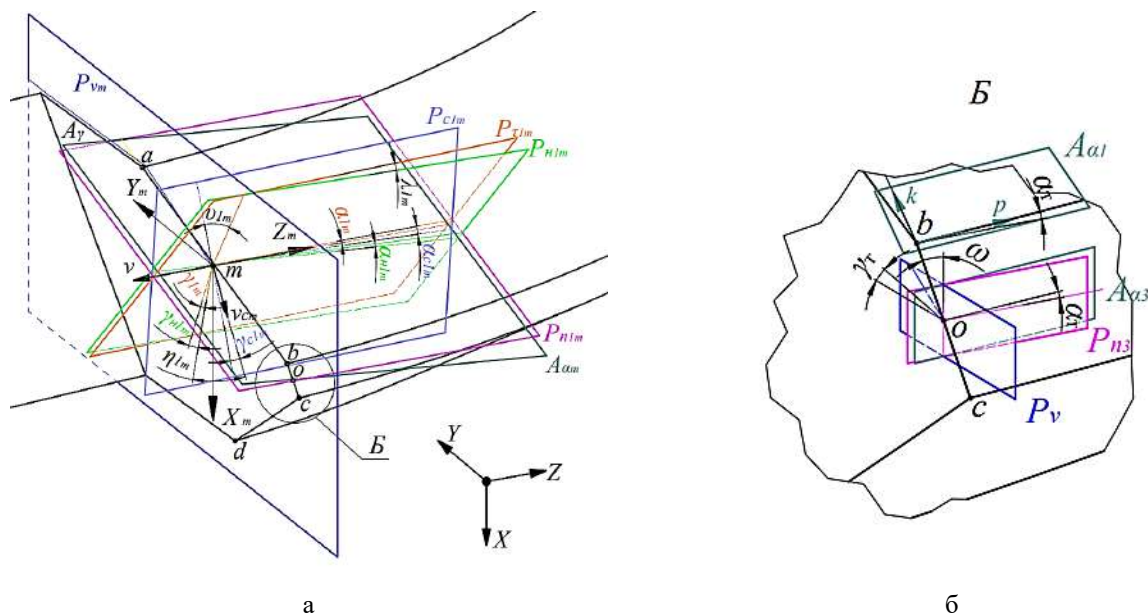


Рис. 2. Расчетная схема для определения геометрических параметров зуба однодисковой фрезы на кромке 1
Fig. 2. The calculation scheme for determining the geometric parameters of the tooth of the single-disc mill on edge 1

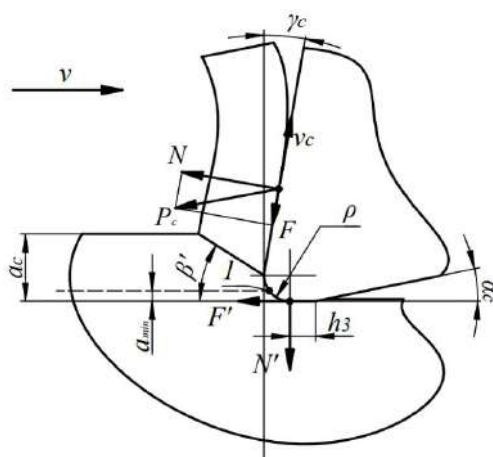


Рис. 3. Составляющие силы, действующие на режущее лезвие каждой кромки резьбообразующего профиля:

1 – точка начала резания, определяемая минимальной толщиной a_{\min}

Fig. 3. The components of cutting force acting on the cutting blade of each edge of the thread-forming profile:

1 is a point of the beginning of cutting determined by minimum thickness a_{\min}

Таблица 1. Геометрические параметры лезвий резьбообразующего профиля зуба однодисковой резьбовой фрезы
Table 1. Geometric parameters of the blades of the thread-forming tooth profile of the single-disc thread mill

Угол	Расчетная зависимость
γ_1	$\arccos \left(\frac{ -1 - \operatorname{tg} \beta_1 ^2}{\sqrt{1 + \operatorname{tg} \beta_1^2 + (\operatorname{tg} \beta_1 \cdot \operatorname{tg} \gamma_T - \operatorname{tg} \omega)^2} \cdot \sqrt{1 + \operatorname{tg} \beta_1^2}} \right)$
γ_2	$\arccos \left(\frac{ -1 - \operatorname{tg} \beta_2 ^2}{\sqrt{1 + \operatorname{tg} \beta_2^2 + (\operatorname{tg} \beta_2 \cdot \operatorname{tg} \gamma_T + \operatorname{tg} \omega)^2} \cdot \sqrt{1 + \operatorname{tg} \beta_2^2}} \right)$
γ_3	γ_T
α_1	$\arccos \left(\frac{ -(1 + \operatorname{tg} \beta_1^2) ^2}{\sqrt{\operatorname{tg} \beta_1^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha_T^2 + \operatorname{tg} \beta_1^4 \cdot \operatorname{tg} \alpha_T^2 + (-\operatorname{tg} \beta_1^2 - 1)^2} \cdot \sqrt{(\operatorname{tg} \beta_1^2 + 1)^2}} \right)$
α_2	$\arccos \left(\frac{ -(1 + \operatorname{tg} \beta_2^2) ^2}{\sqrt{\operatorname{tg} \beta_2^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha_T^2 + \operatorname{tg} \beta_2^4 \cdot \operatorname{tg} \alpha_T^2 + (1 + \operatorname{tg} \beta_2^2)^2} \cdot \sqrt{(-1 - \operatorname{tg} \beta_2^2)^2}} \right)$
α_3	α_T
λ_1	$\arccos \left(\frac{ -1 - \operatorname{tg} \beta_1 ^2}{\sqrt{\operatorname{tg} \beta_1^2 + 1 + (\operatorname{tg} \gamma_T + \operatorname{tg} \beta_1 \cdot \operatorname{tg} \omega)^2} \cdot \sqrt{\operatorname{tg} \beta_1^2 + 1}} \right)$
λ_2	$\arccos \left(\frac{ -1 - \operatorname{tg} \beta_2 ^2}{\sqrt{\operatorname{tg} \beta_2^2 + 1 + (\operatorname{tg} \gamma_T - \operatorname{tg} \beta_2 \cdot \operatorname{tg} \omega)^2} \cdot \sqrt{\operatorname{tg} \beta_2^2 + 1}} \right)$
λ_3	ω
γ_{H1}	$\arccos \left(\frac{ -1 - A_{H1} \cdot \operatorname{tg} \gamma_T - (\operatorname{tg} \beta_1 + A_{H1} \cdot \operatorname{tg} \omega) \cdot \operatorname{tg} \beta_1 }{\sqrt{(-1 - A_{H1} \cdot \operatorname{tg} \gamma_T)^2 + (\operatorname{tg} \beta_1 + A_{H1} \cdot \operatorname{tg} \omega)^2 + (-\operatorname{tg} \beta_1 \cdot \operatorname{tg} \gamma_T + \operatorname{tg} \omega)^2} \cdot \sqrt{1 + \operatorname{tg} \beta_1^2}} \right),$ где $A_{H1} = \operatorname{tg} \gamma_T + \operatorname{tg} \beta_1 \cdot \operatorname{tg} \omega$
γ_{H2}	$\arccos \left(\frac{ -1 + A_{H2} \cdot \operatorname{tg} \gamma_T + (A_{H2} \cdot \operatorname{tg} \omega - \operatorname{tg} \beta_2) \cdot \operatorname{tg} \beta_2 }{\sqrt{(-1 + A_{H2} \cdot \operatorname{tg} \gamma_T)^2 + (A_{H2} \cdot \operatorname{tg} \omega - \operatorname{tg} \beta_2)^2 + (\operatorname{tg} \beta_2 \cdot \operatorname{tg} \gamma_T + \operatorname{tg} \omega)^2} \cdot \sqrt{1 + \operatorname{tg} \beta_2^2}} \right),$ где $A_{H2} = \operatorname{tg} \gamma_T - \operatorname{tg} \beta_2 \cdot \operatorname{tg} \omega$

$\gamma_{н3}$	$\arccos \left(\frac{ -1 - \operatorname{tg} \omega^2 }{\sqrt{(\operatorname{tg} \omega \cdot \operatorname{tg} \gamma_T)^2 + (1 + \operatorname{tg} \omega^2)^2 + \operatorname{tg} \gamma_T^2}} \right)$
γ_{c1}	$\arccos \left(\frac{ -1 - (\operatorname{tg}(\beta_1 - v_1))^2 }{\sqrt{1 + (\operatorname{tg}(\beta_1 - v_1))^2 + (\operatorname{tg}(\beta_1 - v_1) \cdot \operatorname{tg} \gamma_T - \operatorname{tg} \omega)^2} \cdot \sqrt{1 + \operatorname{tg}(\beta_1 - v_1)^2}} \right)$
γ_{c2}	$\arccos \left(\frac{ -1 - (\operatorname{tg}(\beta_2 - v_2))^2 }{\sqrt{1 + (\operatorname{tg}(\beta_2 - v_2))^2 + (\operatorname{tg}(\beta_2 - v_2) \cdot \operatorname{tg} \gamma_T + \operatorname{tg} \omega)^2} \cdot \sqrt{1 + \operatorname{tg}(\beta_2 - v_2)^2}} \right)$
γ_{c3}	$\arccos \left(\frac{ \operatorname{tg} v_3^2 - 1 }{\sqrt{\operatorname{tg} v_3^2 + 1 + (\operatorname{tg} v_3 \cdot \operatorname{tg} \omega - \operatorname{tg} \gamma_T)^2} \cdot \sqrt{\operatorname{tg} v_3^2 + 1}} \right)$
α_{c1}	$\arccos \left(\frac{ (-A_{c1} - 1)^2 }{\sqrt{(-\operatorname{tg} \beta_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha_T)^2 + (-A_{c1} - 1)^2 + (-A_{c1} \cdot \operatorname{tg} \alpha_T)^2} \cdot \sqrt{(-A_{c1} - 1)^2}} \right),$ где $A_{c1} = \operatorname{tg} \beta_1 \cdot \operatorname{tg}(\beta_1 - v_1)$
α_{c2}	$\arccos \left(\frac{ (-A_{c2} - 1)^2 }{\sqrt{(\operatorname{tg} \beta_2 \cdot \operatorname{tg} \alpha_T)^2 + (-A_{c2} - 1)^2 + (-A_{c2} \cdot \operatorname{tg} \alpha_T)^2} \cdot \sqrt{(-A_{c2} - 1)^2}} \right),$ где $A_{c2} = \operatorname{tg} \beta_2 \cdot \operatorname{tg}(\beta_2 - v_2)$
α_{c3}	$\arccos \left(\frac{1}{\sqrt{(\operatorname{tg} v_3 \cdot \operatorname{tg} \alpha_T)^2 + \operatorname{tg} \alpha_T^2 + 1}} \right)$
φ_1	$\arccos \left(\frac{ -\operatorname{tg} \gamma_T \cdot \operatorname{tg} \beta_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha_T + \operatorname{tg} \beta_1 }{\sqrt{(\operatorname{tg} \gamma_T \cdot \operatorname{tg} \beta_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha_T + \operatorname{tg} \beta_1)^2 + (\operatorname{tg} \omega \cdot \operatorname{tg} \beta_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha_T - 1)^2}} \right)$
φ_2	$\arccos \left(\frac{ -\operatorname{tg} \gamma_T \cdot \operatorname{tg} \beta_2 \cdot \operatorname{tg} \alpha_T + \operatorname{tg} \beta_2 }{\sqrt{(-\operatorname{tg} \gamma_T \cdot \operatorname{tg} \beta_2 \cdot \operatorname{tg} \alpha_T + \operatorname{tg} \beta_2)^2 + (-\operatorname{tg} \omega \cdot \operatorname{tg} \beta_2 \cdot \operatorname{tg} \alpha_T + 1)^2}} \right)$
φ_3	$\arccos \left(\frac{ -\operatorname{tg} \gamma_T \cdot \operatorname{tg} \alpha_T + 1 }{\sqrt{(\operatorname{tg} \gamma_T \cdot \operatorname{tg} \alpha_T - 1)^2 + (\operatorname{tg} \omega \cdot \operatorname{tg} \alpha_T)^2}} \right)$

Таблица 2. Основные расчетные формулы модели силы резания [10]
 Table 2. Basic calculation formulas of the cutting force model [10]

Параметр модели	Вид зависимости
Угол сдвига β'	$\beta' = \arctg \left(\frac{0,5 \cdot \left(\frac{Pe}{F} \right)^{0,05 \cdot \sqrt{F}} \cdot K_1 \cdot E^{-0,02 \cdot E}}{(1 - \gamma_c)^{0,2} \cdot \left(1 + \frac{h_3}{\rho} \right)^{0,05}} \right),$ <p>где $Pe = v \cdot \frac{a_c}{a}$, $F = \beta \cdot \varepsilon \cdot \frac{\lambda_p}{\lambda}$, $E = \frac{\rho}{a_c}$ – безразмерные критерии подобия, зависящие от: v – скорости резания, м/с; a_c – толщины срезаемого слоя в плоскости деформации, мм; a – коэффициента температуропроводности обрабатываемого материала, м²/с; β – угла заострения режущего клина на лезвии, рад; ε – угла при вершине в плане, рад; λ_p, λ – коэффициентов теплопроводности инструментального и обрабатываемого материалов, Дж/(м·с·°С); K_1 – экспериментального коэффициента, характеризующего влияние инструментального покрытия и используемого СОТС; h_3 – величины износа на задней поверхности, мм</p>
Сила стружкообразования P_c	$P_c = \frac{\tau_p \cdot a_c \cdot b}{(\sin \beta')^2},$ <p>где τ_p – касательное напряжение в плоскости сдвига, МПа, $\tau_p = 0,8 \cdot \sigma_b$ (для стали) (здесь σ_b – предел прочности, МПа); b – ширина срезаемого слоя, мм</p>
Нормальная сила на передней поверхности N	$N = P_c \cdot \sin(2 \cdot \beta' - \gamma_c)$
Касательная сила на передней поверхности F	$F = P_c \cdot \cos(2 \cdot \beta' - \gamma_c)$
Нормальная сила на задней поверхности N'	$N' = \tau_p \cdot \psi \cdot b \cdot \Delta \cdot \cos \alpha_c \cdot \left(\frac{1}{\mu_1} + \tg \alpha_c \right),$ <p>где ψ – вспомогательный безразмерный коэффициент; Δ – общая длина контакта по задней поверхности, мм; μ_1 – коэффициент трения по задней поверхности</p>
Касательная сила на задней поверхности F'	$F' = \tau_p \cdot \psi \cdot b \cdot \Delta \cdot \cos \alpha_c \cdot \left(1 - \frac{\tg \alpha_c}{\mu_1} \right)$

Для определения параметров сечения срезаемого слоя использовалась теоретическая модель, представленная в работе [11], которая основана на получении срезаемого слоя, образованного двумя соседними положениями зубьев инструмента, смещенными на величину Δz (рис. 4). Представленная в работе [11] расчетная схема была доработана с учетом искажения профиля при сечении срезаемого слоя относительно разных положений инструмента. При расчете учитывались несимметричность сечения срезаемого слоя из-за сложной кинематики резбозерования, различные углы в сечении и неравномер-

ность толщины между соседними проходами, радиальное биение инструмента. Параметры срезаемого слоя на каждой стороне определялись координатным способом с использованием зависимостей, определяющих расстояние между узловыми точками, показанными на рис. 4.

Предложенный расчет толщины срезаемого слоя корректировался с учетом радиуса округления режущей кромки и радиального биения фрезы.

Значения составляющих силы резания при фрезеровании однодисковой фрезой могут быть рассчитаны согласно (1) по углу контакта $\theta \in [\theta_{\min}; \theta_{\max}]$

(см. **рис. 1**) с учетом приращения угла $\Delta\theta$ по формулам

$$P_t = \begin{bmatrix} P_{t0}(\theta_{\min}) \\ P_{t1}(\theta_{\min} + 1 \cdot \Delta\theta) \\ P_{t2}(\theta_{\min} + 2 \cdot \Delta\theta) \\ \vdots \\ P_{ti}(\theta_{\min} + i \cdot \Delta\theta) \end{bmatrix}; \quad P_r = \begin{bmatrix} P_{r0}(\theta_{\min}) \\ P_{r1}(\theta_{\min} + 1 \cdot \Delta\theta) \\ P_{r2}(\theta_{\min} + 2 \cdot \Delta\theta) \\ \vdots \\ P_{ri}(\theta_{\min} + i \cdot \Delta\theta) \end{bmatrix}; \quad P_z = \begin{bmatrix} P_{z0}(\theta_{\min}) \\ P_{z1}(\theta_{\min} + 1 \cdot \Delta\theta) \\ P_{z2}(\theta_{\min} + 2 \cdot \Delta\theta) \\ \vdots \\ P_{zi}(\theta_{\min} + i \cdot \Delta\theta) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где i – количество приращений по углу контакта.

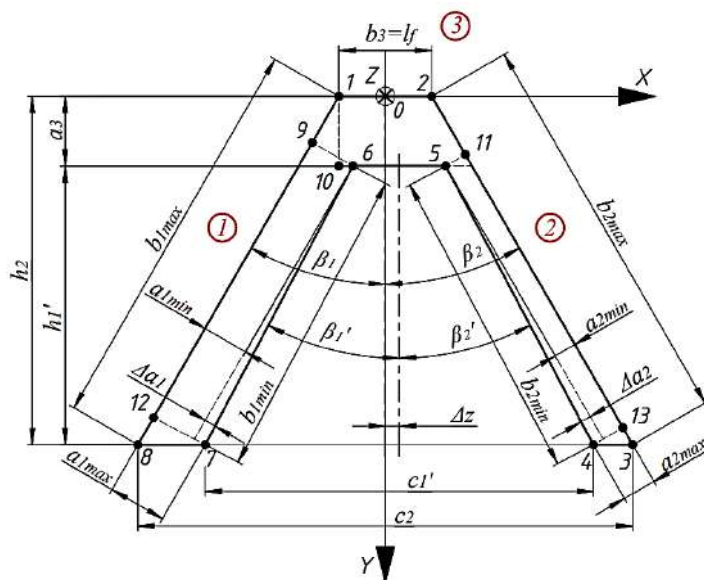


Рис. 4. Расчетная схема определения координат точек срезаемого слоя

Fig. 4. The calculation scheme for determining the coordinates of the points of the cut layer

Сравнительный анализ теоретической и экспериментальной моделей силы

Для проверки адекватности разработанных теоретических зависимостей составляющих силы при фрезеровании резьбы однодисковой фрезой использовались данные лабораторного эксперимента по измерению силы резания [12], который заключался в реализации кинематической схемы резбозфрезерования единичным резцом с использованием инструментальной системы на базе координатно-расточного станка с ЧПУ модели 24К40СФ4, которая представлена на **рис. 5, а**. В шпиндель станка устанавливалась расточная головка (поз. 1) с державкой (поз. 2) и установленным в державке резцом (поз. 3 на **рис. 5, б**) из твердого сплава ВК10, имитирующим дисковую однозубую резбовую фрезу. Резцы изготавливались с различными углами наклона режущей кромки на фасочной части резца (**рис. 5, в**). Для измерения составляющих силы резания использовался контрольно-измерительный диагностический стенд на базе динамометра Kistler 9257В (поз. 5), закрепленным на столе станка. В качестве заготовки (поз. 4) использовался прокат круглый из стали 45 с предварительно подготовленными полуотверстиями (поз. 4).

Для представленной системы был разработан план

эксперимента (принятые константы соответствуют **рис. 6**, диапазон изменения параметров плана – **рис. 7**), а полученные результаты обрабатывались в соответствии с методикой [12] путем совмещения положения резца по времени, снятым с динамометра с его теоретическим положением при обработке резьбы [12]. Для сравнения расчетных значений составляющих силы с экспериментальными данными все значения были приведены к углу контакта θ (см. **рис. 6**).

На **рис. 7** представлены графики расчетных и экспериментальных значений составляющих силы при фрезеровании резьбы однодисковой фрезой. При построении экспериментальных зависимостей вычислялись средние значения максимума составляющих силы резания для всех комбинаций параметров по всему плану эксперимента. Максимальные значения по углу контакта для представленных значений параметров на **рис. 6** следующие: $P_t = 90,5$ Н, $P_r = 50,8$ Н, $P_z = 34$ Н. Средняя ошибка расчетных значений по всему эксперименту не превысила 6% для касательных P_t и радиальных P_r составляющих силы. Расхождение P_z является наибольшим и не превышает 15%. Это можно объяснить тем, что P_z складывается из двух слагаемых на боковых сторонах резбообразующего профиля, разных по знаку (см. **рис. 1**), в результате чего на основной части срезаемого слоя получается меньшее

значение составляющей P_z , чем на хвостовой части [11], когда резание одной из сторон пропадает, что связано с увеличением силы резания на тонких стружках (см. рис. 6, $\theta = 2-8^\circ$). По окончании резания одной из сторон резьбообразующего профиля предполагается, что происходит упругое воздействие на инструмент с другой стороны резьбообразующего профиля, в результате уменьшается толщина на этой боковой стороне и длина хвостовой части, что может приводить к уменьшению составляющей силы P_z , что не учитыва-

лось в расчетной модели.

Сравнение расчетных зависимостей с экспериментальными показали соблюдение тенденций их изменений для всех составляющих силы при резьбофрезеровании. Расчетные значения (1) осевой составляющей P_z отличаются направлением и, соответственно, знаком при встречном и попутном фрезеровании. Совпадение направлений осевой составляющей с результатами эксперимента также подтвердило работоспособность системы.

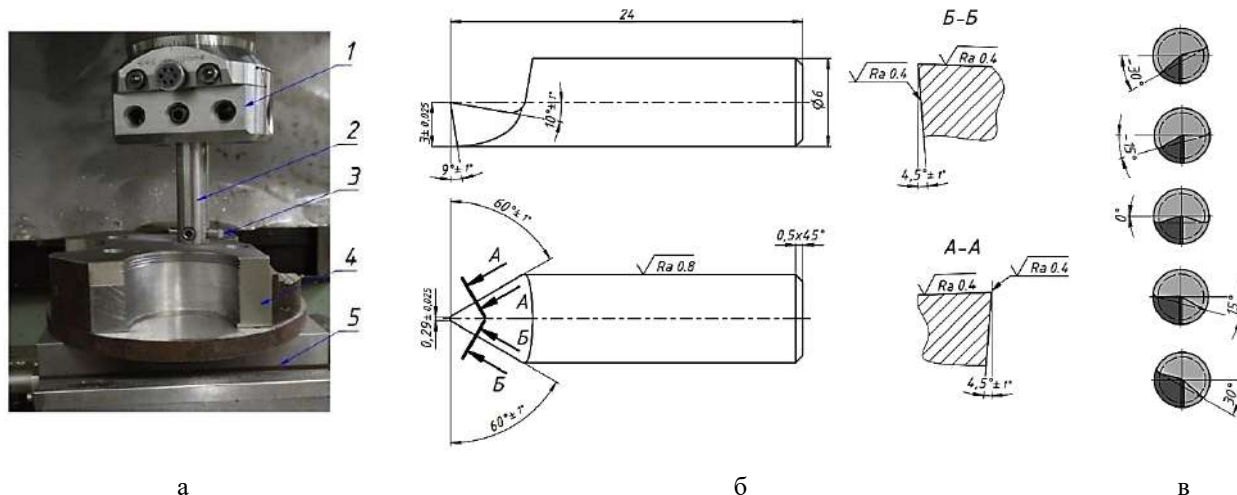


Рис. 5. Инструментальная система для измерения составляющих силы резания: а – общий вид: 1 – расточная головка; 2 – державка; 3 – резьбовой резец; 4 – заготовка; 5 – динамометрическая система; б – параметры резьбового резца; в – вид резца при разных углах наклона режущей кромки на фасочной части ω

Fig. 5. The tool system for measuring the components of cutting force: а is a general view: 1 is a boring head, 2 is a holder, 3 is a thread tool, 4 is a workpiece, 5 is a dynamometer system; б are parameters of the thread tool; в is the type of the cutter at different angles of inclination of the cutting edge on chamfer ω

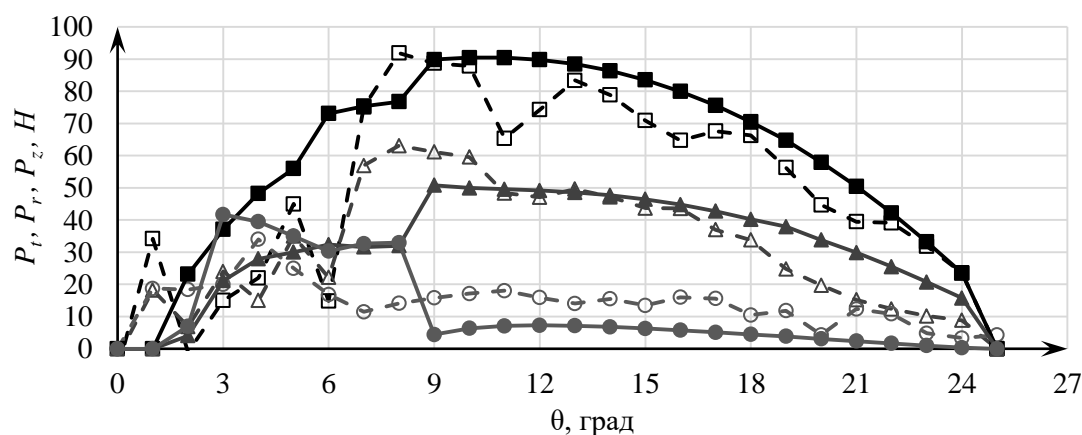


Рис. 6. Сравнение экспериментальных $P_t(\square)$, $P_r(\Delta)$, $P_z(\circ)$ и расчетных $P_t(\blacksquare)$, $P_r(\blacktriangle)$, $P_z(\bullet)$ составляющих силы резания вдоль угла контакта θ ($D = 68$ мм, $P = 2$ мм, $D_l = 66$ мм, $d_p = 48$ мм, $l_f = 0,29$ мм, $\omega = 0^\circ$, $\gamma_T = 10^\circ$, $\alpha_T = 9^\circ$, $\rho_1 = 0,015$ мм; $\rho_2 = 0,015$ мм; $\rho_3 = 0,022$ мм; $h_{31} = 0,07$ мм; $h_{32} = 0,07$ мм; $h_{33} = 0,08$ мм, $V = 90$ м/мин, $S_z = 0,12$ мм/зуб, направление фрезерования: попутное)

Fig. 6. Comparison of experimental $P_t(\square)$, $P_r(\Delta)$, $P_z(\circ)$ and calculated $P_t(\blacksquare)$, $P_r(\blacktriangle)$, $P_z(\bullet)$ components of cutting force along contact angle θ ($D = 68$ мм, $P = 2$ мм, $D_l = 66$ мм, $d_p = 48$ мм, $l_f = 0,29$ мм, $\omega = 0^\circ$, $\gamma_T = 10^\circ$, $\alpha_T = 9^\circ$, $\rho_1 = 0,015$ мм; $\rho_2 = 0,015$ мм; $\rho_3 = 0,022$ мм; $h_{31} = 0,07$ мм; $h_{32} = 0,07$ мм; $h_{33} = 0,08$ мм, $V = 90$ м/мин, $S_z = 0,12$ мм/tooth, down milling)

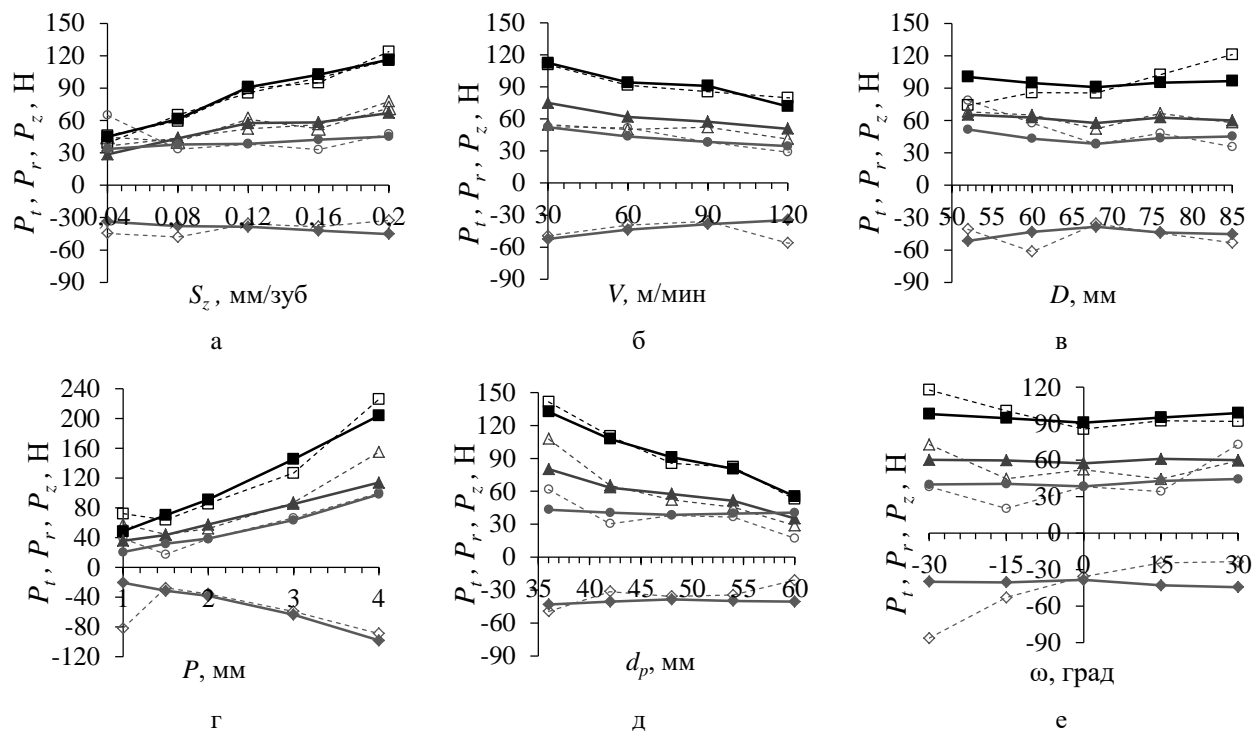


Рис. 7. Графики расчетных зависимостей ($P_f(\blacksquare)$, $P_f(\blacktriangle)$, для попутного - $P_z(\bullet)$ и для встречного $P_z(\blacklozenge)$) и экспериментальных зависимостей ($P_f(\square)$, $P_f(\Delta)$, для попутного - $P_z(\circ)$, для встречного - $P_z(\diamond)$) составляющих силы резания от подачи S_z (а), скорости резания V (б), диаметра резьбы D (в), шага резьбы P (г), диаметра рабочей части инструмента d_p (д) и угла наклона режущей кромки на фасочной части ω (е)

Fig. 7. Graphs of calculated dependencies ($P_t(\blacksquare)$, $P_r(\blacktriangle)$, for down milling $P_z(\bullet)$ and for up milling $P_z(\blacklozenge)$) and experimental dependencies ($P_t(\square)$, $P_r(\Delta)$, for down milling $P_z(\circ)$, for up milling $P_z(\diamond)$) components of cutting force from feed S_z (a), cutting speed V (б), thread diameter D (в), thread pitch P (г), diameter of the working part of the tool d_n (д) and the angle of inclination of the cutting edge on chamfer ω (е)

Заключение

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что разработанная теоретическая модель силы резания при резьбофрезеровании однодисковой фрезой подтверждена результатами экспериментального исследования и может быть использована в дальнейшем как для расчета силы при фрезеровании однодисковыми резцовыми фрезами, так и является основой для разработки комплексной модели для определения силы при обработке гребенчатыми резцовыми фрезами, анализа конусности резьбы, исследования равномерности резьбофрезерования и управления амплитудой составляющих силы при резьбофрезеровании.

Список источников

1. Зорохович А.А. Резьбофрезерование и резьбофрезерные станки. М.: Оборонгиз, 1940. 147 с.
2. Сайкин С.А., Цветков Е.В., Толкачев А.В. Измерение силы резания и крутящего момента при

резьбофрезеровании // Научные технологии в машиностроении. 2023. №1(139). С. 24-30. DOI: 10.30987/2223-4608-2023-1-24-30

3. Косарев В.А., Гречишников В.А., Косарев Д.В. Исследование силовых параметров при фрезеровании внутренних резьб с планетарным движением инструмента // СТИН. 2009. №8. С. 19-22.
4. A model for thread milling cutting forces / Araujo A.C., Silveira J.L., Jun M.B., Kapoor S.G., DeVor R. // International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, vol. 46 (15), pp. 2057-2065.
5. Мальков О.В., Головки И.М. Экспериментальное определение модели силы при резьбозаготовке // Инновации в машиностроении: сборник трудов Международной молодежной конференции. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. С. 73-77.
6. Araujo A.C., Fromentin G., Poulachon G. Analytical and experimental investigations on thread milling forces in titanium alloy // International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2013, vol. 67, pp. 28-34.
7. Волков Д.И., Сайкин С.А. Расчет силы резания при фрезеровании внутренней резьбы в жаропрочных сплавах // Вестник Рыбинской государственной

- авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2010. №1(16). С. 145-150.
8. Бобров В.Ф. Многопроходное нарезание крепежных резьб резцом. М.: Машиностроение, 1982. 104 с.
 9. Розенберг Ю.А., Тахман С.И. Силы резания и методы их определения: учеб. пособие. Ч. 1. Общие положения. Курган: Изд-во Курганского машиностроительного ун-та, 1995. 130 с.
 10. Рыкунов А.Н. Триботехнические особенности чистовой лезвийной обработки и их влияние на силу резания // Физика, химия и механика трибосистем. 2011. №11. С. 123-131.
 11. Мальков О.В., Головки И.М., Карельский А.С. Теоретический расчет параметров сечения срезаемого слоя при резбозаготовке // Известия вузов. Машиностроение. 2018. №10 [703]. С. 24-36. DOI: 10.18698/0536-1044-2018-10-24-36
 12. Malkov O.V., Karelskiy A.S. Cutting Force Analysis During Thread Milling // Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021). ICIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Cham, Springer, 2022, pp. 563-573. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85230-6_67
 5. Malkov O.V., Golovko I.M. Experimental determination of the force model during thread milling. *Innovatsii v mashinostroenii: sbornik trudov Mezhdunarodnoy molodezhnoy konferentsii* [Innovations in Mechanical Engineering: Proceedings of the International Youth Conference]. Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University, 2012, pp. 73-77. (In Russ.)
 6. Araujo A.C., Fromentin G., Poulachon G. Analytical and experimental investigations on thread milling forces in titanium alloy. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2013;67:28-34.
 7. Volkov D.I., Saikin S.A. Calculation of cutting force, when milling internal threads in heat-resistant alloys. *Vestnik Rybinskoy gosudarstvennoy aviatsionnoy tekhnologicheskoy akademii im. P.A. Solovyeva* [Vestnik of Solovyev Rybinsk State Aviation Technological Academy]. 2010;(1(16)):145-150. (In Russ.)
 8. Bobrov V.F. *Mnogoprokhodnoe narezanie krepezhnykh rezb reztsom* [Multi-pass cutting of fastening threads with a cutter. Moscow: Mashinostroenie, 1982, 104 p. (In Russ.)
 9. Rozenberg Yu.A., Takhman S.I. *Sily rezaniya i metody ikh opredeleniya: ucheb. posobie. Chast 1. Obshchie polozheniya* [Cutting forces and methods of their determination: study guide. Part 1. General provisions]. Kurgan: Publishing House of Kurgan Mechanical Engineering University, 1995, 130 p. (In Russ.)
 10. Rykunov A.N. Tribotechnological features of finishing edge cutting machining and their influence on cutting force. *Fizika, khimiya i mekhanika tribosistem* [Physics, Chemistry and Mechanics of Tribosystems]. 2011;(11):123-131. (In Russ.)
 11. Malkov O.V., Golovko I.M., Karelskiy A.S. Theoretical calculation of the parameters of the section of the cut layer during threading. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building]. 2018;(10(703)):24-36. (In Russ.) DOI: 10.18698/0536-1044-2018-10-24-36
 12. Malkov O.V., Karelskiy A.S. Cutting force analysis during thread milling. Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021). ICIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Cham, Springer, 2022, pp. 563-573. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85230-6_67

References

1. Zorokhovitch A.A. *Rezborezovanie i rezboreznye stanki* [Threading and threading machines]. Moscow: Oborongiz, 1940, 147 p. (In Russ.)
2. Saikin S.A., Tsvetkov E.V., Tolkachev A.V. Measurement of cutting force and torque during thread milling. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii* [Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering]. 2023;(1(139)):24-30. (In Russ.) DOI: 10.30987/2223-4608-2023-1-24-30
3. Kosarev V.A., Grechishnikov V.A., Kosarev D.V. Study on force parameters during milling of internal threads with planetary movement of the tool. *STIN* [Machines and Tools]. 2009;(8):19-22. (In Russ.)
4. Araujo A.C., Silveira J.L., Jun M.B., Kapoor S.G., DeVor R. A model for thread milling cutting forces. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2006;46(15):2057-2065.

Поступила 17.08.2023; принята к публикации 05.09.2023; опубликована 25.12.2023
Submitted 17/08/2023; revised 05/09/2023; published 25/12/2023

Мальков Олег Вячеславович – кандидат технических наук, доцент,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.
Email: malkov@bmstu.ru. ORCID 0000-0002-2373-4547

Карельский Александр Сергеевич – кандидат технических наук, ассистент,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.
Email: askarel@bmstu.ru. ORCID 0000-0002-8335-7579

Oleg V. Malkov – PhD (Eng.), Associate Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia.
Email: malkov@bmstu.ru. ORCID 0000-0002-2373-4547

Aleksandr S. Karelskiy – PhD (Eng.), Assistant, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia.
Email: askarel@bmstu.ru. ORCID 0000-0002-8335-7579

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

УДК 67.05

DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-4-56-62



МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ЛИСТОВОГО МЕТАЛЛА ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ НОЖАМИ

Терентьев Д.В., Байгузин М.Р., Платов С.И., Звягина Е.Ю., Тютеряков Н.Ш.

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

Аннотация. В настоящей работе проведено математическое моделирование процесса резания параллельными ножами. Выявлено, что важно учитывать при проектировании процесса резания влияние сил резания на механические свойства металла разрезаемой полосы, форму и размеры режущих инструментов, а также условия процесса, что позволяет производить более точные расчеты для определения оптимальных параметров резания и подбора режущих инструментов с целью повышения производительности и качества процесса резания. Результаты работы позволили снизить расхождение расчетных и экспериментальных значений усилий резания на 30% по сравнению с серией экспериментов, использующих методику Королева А.А. В работе представлены экспериментальные данные по определению коэффициента надреза ε_n . Предложенный способ определения коэффициента надреза металлов является одним из методов исследования резания металлов. Он основан на использовании наклонных ножей при резке клиновых листовых образцов. Этот метод позволяет получить данные о геометрических параметрах зоны резания и повышает точность расчета усилий резания наклонными ножами. Точность определения коэффициента надреза является важным фактором в механике резания. Это позволяет рассчитать необходимые параметры режима резания для максимальной эффективности и минимальных потерь материала и времени. Кроме того, использование наклонных ножей при резке клиновых листовых образцов может быть полезным при тестировании новых материалов или при разработке новых инструментов для резания металлов.

Ключевые слова: листовые ножницы, коэффициент надреза, процесс резания

© Терентьев Д.В., Байгузин М.Р., Платов С.И., Звягина Е.Ю., Тютеряков Н.Ш., 2023

Для цитирования

Математическое моделирование процесса резания листового металла параллельными ножами / Терентьев Д.В., Байгузин М.Р., Платов С.И., Звягина Е.Ю., Тютеряков Н.Ш. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №4. С. 56-62. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-56-62>



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

MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF CUTTING SHEET METAL WITH PARALLEL KNIVES

Terentyev D.V., Baiguzin M.R., Platov S.I., Zvyagina E.Yu., Tyuteryakov N.Sh.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. This paper considers mathematical modeling of the cutting process with parallel knives. It has been found that when designing the cutting process, it is important to factor into the influence of cutting forces on the mechanical properties of steel of the strip being cut, the shape and dimensions of cutting tools, as well as the process conditions, to get more accurate calculations, determine optimal cutting parameters and select cutting tools to improve performance and the quality of the cutting process. The research results contributed to reducing the discrepancy between the calculated and experimental values of cutting forces by 30% as compared with a series of experiments using the Korolev technique. The paper presents experimental data on determining cutting coefficient ε_n . The method proposed for determining the cutting coefficient is one of the methods for studying metal cutting. It is based on cutting wedge-shaped sheet samples with inclined knives. This method is used to obtain data on the geometric parameters of the cutting zone and increase accuracy of calculating the forces of cutting with inclined knives. Accuracy of determining the cutting coefficient is an important factor in cutting mechanics to calculate the required parameters of the cutting mode to achieve maximum efficiency and minimal loss of the material and time. In addition, cutting wedge-shaped sheet samples with inclined knives is useful, when testing new materials or developing new tools for cutting metals.

Keywords: sheet metal shears, cutting coefficient, cutting process

For citation

Terentyev D.V., Baiguzin M.R., Platov S.I., Zvyagina E.Yu., Tyuteryakov N.Sh. Mathematical Modeling of the Process of Cutting Sheet Metal with Parallel Knives. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 4, pp. 56-62. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-56-62>

Введение

Ножницы для резки металлических листов работают путем сдвига частей листа друг относительно друга, что приводит к периодическому процессу резки [1-8, 12, 13].

В процессе этого возникают периодические явления в виде вмятия, резания, а также отрыва (рис. 1).

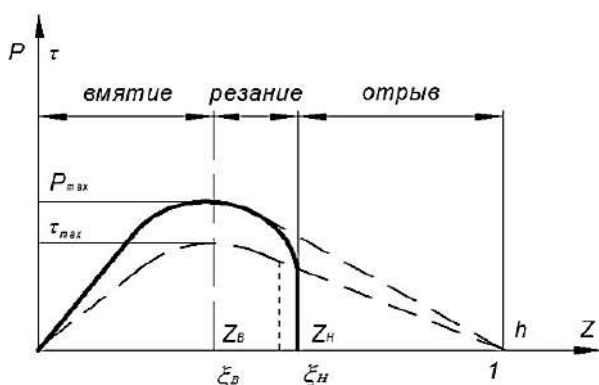


Рис. 1. Характерный вид зависимостей $P = f(\xi)$, $\tau = f(\xi)$ при резании полосы параллельными ножами

Fig. 1. Characteristic dependences $P = f(\xi)$, $\tau = f(\xi)$, when cutting strips with parallel knives

В период резания в первую очередь происходит определенный сдвиг всех основных частей полосы непосредственно по всей плоскости резания, и величины P и τ уменьшаются до нуля.

Коэффициент надреза характеризует периоды вмятия и учитывается в формуле А.А. Королёва, широко используемой для расчета усилий резания:

$$P_{\max} = \frac{(2 - \varepsilon_n) \varepsilon_n}{2 \tan \alpha} h^2 k \sigma_b, \quad (1)$$

где P_{\max} – максимальные значения усилия, прилагаемого при осуществлении резки ножами наклонного типа; k – значение, учитывающее именно боковой зазор, а также значения затупления используемых ножей, изгиб самого металлического листа, а также непосредственно соотношения максимальных пределов прочности по их напряжениям (как нормальным, так и непосредственно касательным); σ_b – максимальное значение прочности использованного в листе материала; $\angle \alpha = 1-6^\circ$ – данный фрагмент обозначает непосредственный угол наклона режущего инструмента.

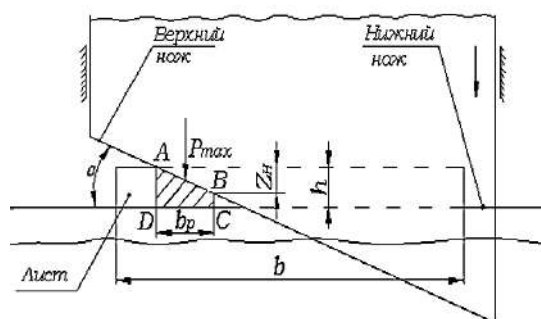
Достоверность расчетов по формуле (1) будет определяться достоверностью значений коэффициента надреза ε_n . Она используется для расчета усилия резания наклонными ножами и основана на предположении, что касательные напряжения равномерны

по всей зоне резания и достигают максимального значения. Однако это допущение приводит к завышению расчетных усилий. Для более точного определения коэффициента надреза ε_n в металлах был предложен экспериментальный метод, основанный на шаговой резке клиновидных листовых образцов наклонными ножами. Этот метод позволит получить более точные данные для расчета усилий резания.

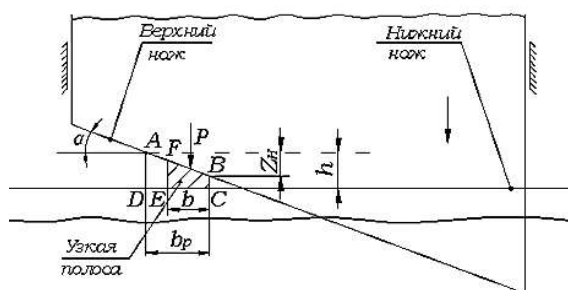
В точной аналогии с изображенной на рис. 2 схемой зависимости для максимально точного определения значения надреза можно непосредственно представить в виде следующей формулы:

$$\varepsilon_n = \frac{b_p \cdot \operatorname{tg} \alpha}{h}; \quad (2)$$

$$b_p = b_r = (1,2 \div 1,6) \frac{\delta \cdot h}{\operatorname{tg} \alpha}. \quad (3)$$



а



б

Рис. 2. Схемы резания наклонными ножами:
а – широкого листа ($b > b_p$); б – узкой полосы ($b < b_p$)

Fig. 2. Diagrams of cutting with inclined knives: а is a wide sheet ($b > b_p$); б is a narrow strip ($b < b_p$)

Таблица 1. Результаты эксперимента

Table 1. Experimental results

Параметр	Номер реза									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ширина реза b , мм	5,57	7,93	10,3	12,64	14,44	17,37	19,71	22,07	24,43	26,78
Усилие резания P , кН	3,94	5,27	7,3	8,95	10,6	11,21	11,25	11,18	11,24	–

Проведение эксперимента

Для эксперимента изготовили образец и осуществили шаговую резку с фиксацией усилия резания P и ширины реза b (рис. 3).

Клиновидные образцы могут использоваться для измерения ширины зоны резания при резке листов. Эти образцы имеют начальную ширину значительно меньше зоны резания и могут быть использованы для шаговой резки с заданным шагом. Этот метод позволяет достигнуть значения ширины зоны резания на узкой длине образца, которое равно ширине зоны резания на широких листах.

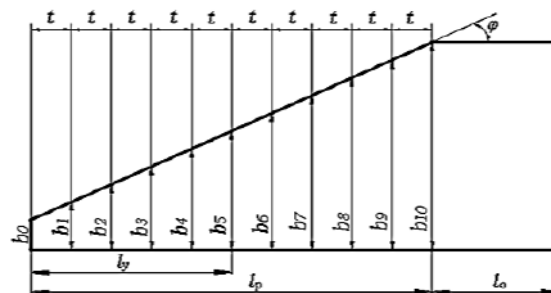


Рис. 3. Форма и размеры клиновидного образца
Fig. 3. Shape and dimensions of the wedge-shaped sample

С учетом зависимости (3)

$$b_0 = \frac{0,25 \cdot 1,2 \delta h}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{0,3 \delta h}{\operatorname{tg} \alpha} \quad (4)$$

принимаем наименьшую ширину образца равной значению b (минимальное значение). Число точек на восходящей линии графика n определяется длиной узкой части отрезка l и шагом резки a , который зависит от конструкции блока резки.

Результаты эксперимента определения коэффициента надреза ε_n в металлах занесены в табл. 1.

Результаты эксперимента определения коэффициента надреза ε_n в металлах показывают, что увеличение усилия резания происходит в самых первых пяти резах, захватывая узкую зону образца. В широкой зоне образца усилие резания практически одинаково в последующих резах. Исходя из этого, был построен график (рис. 4), на котором кривая резания для первых пяти резов пересекается с горизонтальной линией, соответствующей среднему значению усилий резания для 6-9 резов. Далее кривая резания продлена вверх до пересечения с линией среднего значения, величина b_r определяется по точке пересечения этих линий.

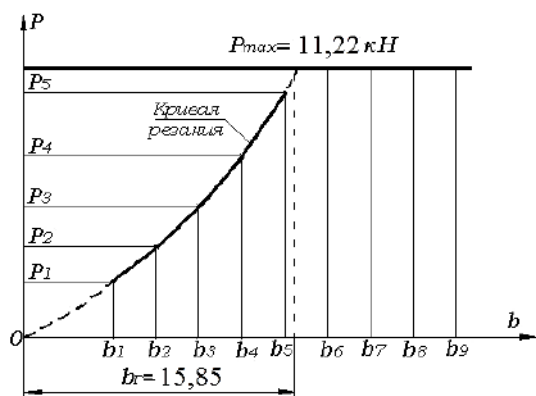


Рис. 4. График зависимости усилия резания $P = f(b)$ от ширины зоны резания

Fig. 4. Diagram of the dependence between cutting force $P = f(b)$ and width of the cutting zone

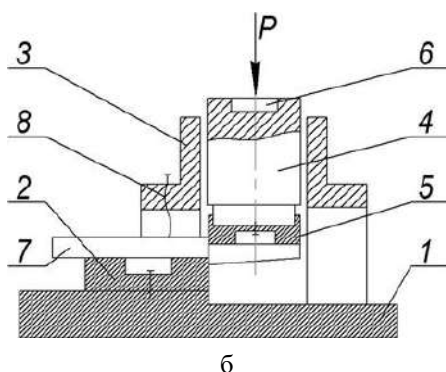
Тогда коэффициент надреза

$$\varepsilon_n = \frac{b_r}{h} \operatorname{tg} \alpha = \frac{15,85 \cdot 0,07}{3} = 0,37.$$

Следующим этапом эксперимента является исследование для определения усилий резания для ряда материалов. Для этого была разработана лабораторная установка (рис. 5, а) с использованием режущего устройства (рис. 5, б).



а



б

Рис. 5. Проведение эксперимента: а – лабораторная установка; б – схема режущего устройства

Fig. 5. Conducting the experiment: а is a laboratory plant, б is a diagram of the cutting tool

На лабораторной установке ЭВМ 1 выводит регистрируемые параметры при помощи датчиков давления и перемещения, которые интегрированы в настольный гидравлический пресс 3 с усилием 100 кН. Насосный агрегат 2 развивает давление 12 МПа, расход 3,2 л/мин, объем бака 7 л.

Конструкция режущего устройства (см. рис. 5, б) включает в себя основание 1, на котором установлен неподвижный нож 2 и направляющие 3. В направляющих перемещается пуансон, который имеет квадратное сечение размером 50×50 мм. На нижнем торце пуансона закреплен подвижный нож 5, а на верхнем торце имеется проточка 6 для установки линзы для компенсации перекосов. Полоса 7 устанавливается между ножами и закрепляется винтом 8.

Исследования проводились в три основных этапа.

В процессе эксперимента резали полосы шириной $b = 45$ мм из стали (толщина $h = 3$ мм), меди (толщина $h = 4$ мм), сплава алюминия (толщина $h = 5$ мм).

По графику (рис. 6) определяли высоту зоны резания Z_B и максимальное усилие резания P_{max} .

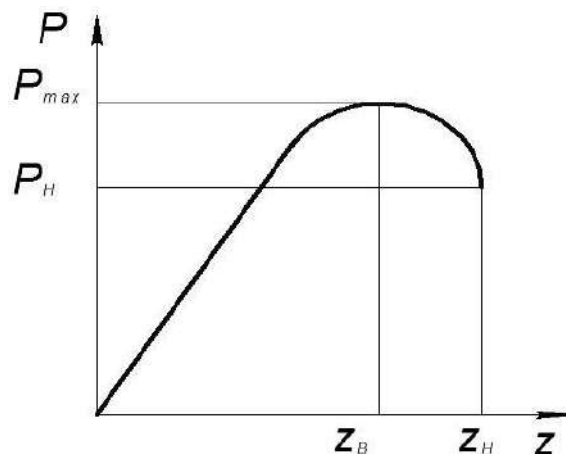


Рис. 6. Характерный вид графиков $P = f(z)$ при резании параллельными ножами

Fig. 6. Characteristic graphs $P = f(z)$, when cutting with parallel knives

Для меди $Z_B = 1,25$ мм; для стали $Z_B = 0,8$ мм; для сплава алюминия $Z_B = 1,65$ мм.

$$\text{Тогда } \xi_B = \frac{Z_B}{h}.$$

$$\xi_B = \frac{1,25}{4} = 0,31 \text{ — для меди;}$$

$$\xi_B = \frac{0,8}{3} = 0,26 \text{ — для стали;}$$

$$\xi_B = \frac{1,65}{5} = 0,33 \text{ — для сплава алюминия.}$$

Максимальные значения усилия резания составили:

$P_{max} = 33,53$ кН — для меди;

$P_{max} = 44,95$ кН — для стали;

$P_{max} = 16,58$ кН — для сплава алюминия.

Силовой параметр $K\sigma_B$ определяли в соответствии с зависимостью

$$P_{\max} = K\sigma_B F_0 (1 - \xi_B). \quad (5)$$

Тогда

$$K\sigma_B = \frac{P_{\max}}{bh(1 - \xi_B)}. \quad (6)$$

$$K\sigma_B = \frac{33,53}{45 \cdot 4 \cdot (1 - 0,31)} = 0,27 \text{ кН/мм}^2 \text{ — для меди;}$$

$$K\sigma_B = \frac{44,95}{45 \cdot 3 \cdot (1 - 0,26)} = 0,45 \text{ кН/мм}^2 \text{ — для стали;}$$

$$K\sigma_B = \frac{16,58}{45 \cdot 5 \cdot (1 - 0,33)} = 0,11 \text{ кН/мм}^2 \text{ — для сплава}$$

алюминия.

На следующем этапе при определении усилия резания наклонными ножами резали заготовки из стали, меди и сплава алюминия тех же размеров, что резали параллельными ножами. При этом использовали ножи с четырьмя значениями угла наклона кромок:

- 1) $\alpha = 10,03^\circ = 0,175$ рад;
- 2) $\alpha = 7,85^\circ = 0,137$ рад;
- 3) $\alpha = 6,31^\circ = 0,11$ рад;
- 4) $\alpha = 4,01^\circ = 0,07$ рад.

На рис. 7 приведен характерный вид графиков за-

висимости $P = f(H)$ при резании полос ограниченной ширины ($b = 45$ мм), где H – величина перемещения подвижного ножа.

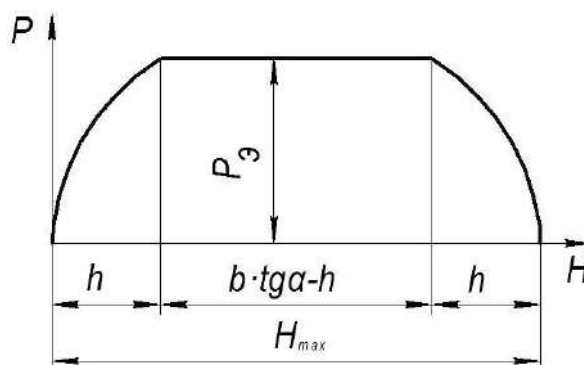


Рис. 7. Характерный вид графиков зависимости $P = f(H)$ при резании наклонными ножами

Fig. 7. Characteristic dependences $P = f(H)$, when cutting with inclined knives

Максимальное перемещение ножа $H_{\max} = b \cdot \operatorname{tg} \alpha + h$ обеспечивает рез заготовки. На величине хода $H = b \cdot \operatorname{tg} \alpha - h \cdot \xi_H$ в средней части усилие резания P_3 имеет постоянную максимальную величину. Экспериментальные значения данных усилий приведены в табл. 2.

Таблица 2. Соотношения усилий резания для ряда материалов
Table 2. Ratios between cutting forces for some materials

Номер ножа	Материал и толщина h , мм	Экспериментальные значения усилий резания P_3 , кН	Расчетные значения усилий резания P , кН		Соотношения усилия резания		
			$P_{\text{Королев}}$	P	$P_{\text{Королев}}/P_3$	P/P_3	P_K/P
1	4-медь	7,08	10,16	7,22	1,43	1,02	1,40
2	4-медь	8,86	12,98	9,22	1,46	1,04	1,33
3	4-медь	10,94	16,17	11,48	1,48	1,05	1,40
4	4-медь	17,87	25,41	18,05	1,42	1,01	1,41
1	3-сталь	4,90	6,97	4,71	1,42	1,04	1,48
2	3-сталь	6,44	8,90	6,02	1,38	1,07	1,47
3	3-сталь	7,87	11,09	7,49	1,41	1,05	1,34
4	3-сталь	11,22	17,43	11,78	1,55	1,05	1,48
3	5-сплав алюминия	6,34	9,85	7,65	1,55	1,05	1,48
4	5-сплав алюминия	10,05	15,48	10,45	1,54	1,04	1,48

Обсуждение результатов

Из табл. 2 видно, что информационные данные усилий резания значительно отличаются от расчетных значений, полученных по известной методике Королева А.А. [1]. Расчетные значения по этой методике завышены в среднем на 1,38-1,55 раза. В свою очередь, усилия, рассчитанные по предлагаемому методу, отличаются от экспериментальных значений только в 1,01-1,07 раза.

Выводы

Экспериментальные данные по определению коэффициента надреза ε_n в металлах показывают, что увеличение усилия резания происходит в самых первых пяти резах, захватывая узкую зону образца. В широкой зоне образца усилие резания практически одинаково в последующих резах.

В ходе математического моделирования процесса резания параллельными ножами было установлено, что в серии экспериментов расхождение расчетных и экспериментальных значений усилий на 30% меньше в сравнении с методикой Королева А.А.

Полученные результаты могут быть использованы при дальнейших исследованиях, связанных с развитием технологии и оборудования процесса резки листового металлопроката на ножницах [9-11, 13].

Список источников

1. Королев А.А. Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станов. М.: Metallurgy, 1985. 376 с.
2. Машины и агрегаты металлургических заводов. В 3-х т. Т. 3. Машины и агрегаты для отделки проката / А.И. Целиков, П.И. Полухин и др. М.: Metallurgy, 1981. 576 с.
3. Потапенков А.П., Байгузин М.Р., Пилипенко С.С. Удельная работа сил резания проката ножницами // Известия вузов. Черная металлургия. 2016. Т. 59. №8. С. 531-535.
4. А.с. № 938091 А1 СССР, МПК G01N 3/24. Образец для испытания листовых материалов на сдвиг в плоскости листа: № 3228808: заявл. 30.12.1980: опубл. 23.06.1982 / А.Д. Матвеев, Н.Ф. Шпунькин, В.М. Готовкин [и др.]; заявитель Московский автомеханический институт.
5. А.с. № 1555645 А1 СССР, МПК G01N 3/00. Способ исследования механических свойств материала: № 4336973: заявл. 30.11.1987: опубл. 07.04.1990 / Г.А. Дробахин; заявитель научно-производственное объединение по технологии машиностроения «ЦНИИТМАШ».
6. А.с. № 1002890 А1 СССР, МПК G01N 3/00, G01N 3/24. Способ определения критического коэффициента интенсивности напряжений при продольном сдвиге: № 3366672: заявл. 16.12.1981: опубл. 07.03.1983 / В.И. Смирнов; заявитель предприятие П/Я А-3700.

7. Пат. № 2132535 С1 Российская Федерация, МПК G01B 15/04. Способ определения формы профилей надрезов на поверхности твердых тел: № 93044155/28: заявл. 13.09.1993: опубл. 27.06.1999 / А.С. Савинов, П.П. Петров, Н.С. Мординов; заявитель Институт физико-технических проблем Севера СО РАН.
8. Лукашкин Н.Д., Кохан Л.С., Якушев А.Н. Конструкции и расчет машин и агрегатов металлургических заводов: учебник для вузов. М.: НКЦ, 2003. 436 с.
9. Терентьев В.С., Цалюк М.Б. Аджюстаж технолитовых станов. Отделочные машины. Свердловск: Металлургиздат. Свердл. отд-ние, 1961. 344 с.
10. Селезнев М.Е., Алексеенко С.В., Боровик П.В. Перспективы развития технологии и оборудования процесса поперечной резки листового металлопроката на ножницах с шевронным ножом // Тяжелое машиностроение. 2019. №5-6. С. 34-36.
11. Никоноров Л.В. Силовые параметры при резании проката ножницами // Технологическое обеспечение качества машин и приборов: сб. ст. II Всерос. науч.-практ. конф. Пенза: Приволжский дом знаний, 2005. С. 25-29.
12. Теория резания: учебник для студентов вузов / П.И. Ящерицын и др. Мн.: Новое знание, 2005. 512 с.
13. Павлова Н.Г., Никитин С.В., Емельюшин А.Н. Исследование условий эксплуатации пресс-ножниц для переработки металлолома с целью повышения их производительности // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. №3(43). С. 81-85. EDN RCNMMX.

References

1. Korolev A.A. *Konstruktsiya i raschet mashin i mekhanizmov prokatnykh stanov* [Design and calculations of machines and mechanisms of rolling mills]. Moscow: Metallurgy, 1985, 376 p. (In Russ.)
2. Tselikov A.I., Polukhin P.I. et al. *Mashiny i agregaty metallurgicheskikh zavodov. V 3-kh t. T. 3. Mashiny i agregaty dlya otdelki prokata* [Machines and lines of metallurgical plants. In 3 volumes. Vol. 3. Machines and lines for trimming rolled products]. Moscow: Metallurgy, 1981, 576 p. (In Russ.)
3. Potapenkov A.P., Baiguzin M.R., Pilipenko S.S. Specific work of forces of cutting the rolled products with shears. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy]. 2016;59(8):531-535. (In Russ.)
4. Matveev A.D., Shpunkin N.F., Gotovkin V.M. et al. *Obrazets dlya ispytaniya listovykh materialov na sdvig v ploskosti lista* [A sample for shear testing of sheet materials in the plane of sheets]. Author's Certificate SU, no. 938091A1, 1982.
5. Drobakhin G.A. *Sposob issledovaniya mekhanicheskikh svoystv materiala* [A method of studying me-

- chanical properties of materials]. Author's Certificate SU, no. 1555645 A1, 1990.
6. Smirnov V.I. *Sposob opredeleniya kriticheskogo koef-fitsienta intensivnosti napryazheniy pri prodolnom sdvige* [A method of determining a critical stress intensity factor during longitudinal shear]. Author's Certificate SU, no. 1002890 A1, 1983.
7. Savinov A.S., Petrov P.P., Mordinov N.S. *Sposob opredeleniya formy profilei nadrezov na poverkhnosti tverdykh tel* [A method of determining a shape of cutting profiles on the surface of solids]. Patent RU, no. 2132535 C1, 1999.
8. Lukashkin N.D., Kokhan L.S., Yakushev A.N. *Konstruktsii i raschet mashin i agregatov metallurgicheskikh zavodov: uchebnik dlya vuzov* [Design and calculations of machines and lines of metallurgical plants: university textbook]. Moscow: NKTs, 2003, 436 p. (In Russ.)
9. Terentev V.S., Tsalyuk M.B. *Adyustazh tekhnologicheskikh stanov. Otdelochnye mashiny* [Auxiliaries of sheet mills. Trimming machines]. Sverdlovsk: Metallurgizdat. Sverdlovsk Branch, 1961, 344 p. (In Russ.)
10. Seleznev M.E., Alekseenko S.V., Borovik P.V. Prospects of development of technology and equipment of cutting to length sheet products by shears with inclined knives. *Tyazheloe mashinostroenie* [Heavy Engineering]. 2019;(5-6):34-36. (In Russ.)
11. Nikonorov L.V. Power parameters of cutting rolled products with shears. *Tekhnologicheskoe obespechenie kachestva mashin i priborov: sb. st. II Vseros. nauch.-prakt. konf.* [Technological quality assurance of machines and devices: Proceedings of the 2nd All-Russian Scientific and Practical Conference]. Penza: Volga Region Center of Knowledge, 2005, pp. 25-29. (In Russ.)
12. Yashcheritsyn P.I. et al. *Teoriya rezaniya: uchebnik dlya studentov vuzov* [Theory of cutting: university textbook]. Minsk: Novoe znanie, 2005, 512 p. (In Russ.)
13. Pavlova N.G., Nikitin S.V., Emelyushin A.N. Studying operation conditions of a shearing press for scrap processing to increase its performance. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2013;(3(43)):81-85. EDN RCNMMX.

Поступила 20.09.2023; принята к публикации 12.10.2023; опубликована 25.12.2023
Submitted 20/09/2023; revised 12/10/2023; published 25/12/2023

Терентьев Дмитрий Вячеславович – доктор технических наук, профессор, ректор, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: dtnterentyev@mail.ru. ORCID 0000-0001-7960-180X

Байгузин Марсель Раисович – соискатель, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: bayguzinmr@nornik.ru.

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

Звягина Елена Юрьевна – кандидат технических наук, доцент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: zviagina_mmf@mail.ru. ORCID 0009-0001-4948-5366

Тютяков Наиль Шаукатович – кандидат технических наук, доцент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: n.tyuteryakov@magtu.ru. ORCID 0000-0002-5008-4156

Dmitry V. Terentyev – DrSc (Eng.), Professor, Rector, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: dtnterentyev@mail.ru. ORCID 0000-0001-7960-180X

Marsel R. Baiguzin – applicant of Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: bayguzinmr@nornik.ru.

Sergey I. Platov – DrSc (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: psipsi@mail.ru. ORCID 0000-0002-4868-4881

Elena Yu. Zvyagina – PhD (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: zviagina_mmf@mail.ru. ORCID 0009-0001-4948-5366

Nail Sh. Tyuteryakov – PhD (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: n.tyuteryakov@magtu.ru. ORCID 0000-0002-5008-4156

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

MATERIALS SCIENCE AND HEAT TREATMENT OF METALS

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

УДК 621.771.09

DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-4-63-69



ВЫБОР СХЕМЫ УСКОРЕННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ РУЛОННОГО ПРОКАТА ИЗ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ НА ОСНОВЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Алексеев Д.Ю., Емалеева Д.Г., Кузнецова А.С., Гулин А.Е., Адищев П.Г., Тетюшин К.П.

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

Аннотация. Постановка задачи. В современных условиях процесс контролируемой прокатки с ускоренным охлаждением широко используется в мировой практике прокатного производства. При разработке технологических режимов и освоении производства инновационных видов проката одной из важнейших научно-практических задач является выбор температурных параметров процесса и схемы охлаждения, обеспечивающих формирование требуемой структуры и свойств готовой продукции. Вместе с тем остается актуальной проблема прогнозирования температурного состояния металла и достижения заданных параметров обработки в промышленных условиях.

Цель работы. Выбор схемы процесса ускоренного охлаждения рулонного проката на основе моделирования теплового состояния металла по сечению полосы. **Используемые методы.** Моделирование проведено в программном комплексе Deform-3D. В ходе исследования использована разработанная авторами модель расчета температурного поля, формируемого в процессе контролируемой прокатки и ускоренного охлаждения стали в условиях широкополосного стана горячей прокатки 2000. Модель учитывает процессы тепловыделения при прокатке, теплоотдачу валкам, а также охлаждение металла при контакте с водой и воздухом. **Результаты.** Предложена конечно-элементная модель, позволяющая прогнозировать скорость охлаждения и распределение температурного поля по сечению проката. На основе анализа результатов конечно-элементного моделирования выбрана схема охлаждения, предусматривающая последовательное включение в работу первых 19-ти секций установки. Это обеспечивает достижение требуемых режимов обработки с учетом конструктивных особенностей используемого оборудования. В ходе опытно-промышленной апробации показана высокая сходимость расчетных и экспериментальных данных. Погрешность полученных данных не превышает 3%.

Ключевые слова: Deform-3D, рулонный прокат, установка ускоренного охлаждения, схема охлаждения, поле температур, скорость охлаждения

Работа подготовлена в Магнитогорском государственном техническом университете им. Г.И. Носова при финансовой поддержке Минобрнауки России, предоставляемой в рамках выполнения комплексного проекта по организации высокотехнологичного производства (Соглашение от 25.06.2021 г. № 075-11-2021-063).

© Алексеев Д.Ю., Емалеева Д.Г., Кузнецова А.С., Гулин А.Е., Адищев П.Г., Тетюшин К.П., 2023

Для цитирования

Выбор схемы ускоренного охлаждения рулонного проката из низколегированной стали на основе конечно-элементного моделирования / Алексеев Д.Ю., Емалеева Д.Г., Кузнецова А.С., Гулин А.Е., Адищев П.Г., Тетюшин К.П. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №4. С. 63-69. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-63-69>



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

SELECTING AN ACCELERATED COOLING SCHEDULE FOR LOW-ALLOY STEEL COILS BASED ON FINITE ELEMENT MODELING

Alekseev D.Yu., Emaleeva D.G., Kuznetsova A.S., Gulin A.E., Adishchev P.G., Tetyushin K.P.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement. In the current conditions, the process of controlled rolling with accelerated cooling is widely used in the world practice of rolling divisions. One of the most important scientific and practical tasks in the development of technological modes and learning of the production of innovative types of rolled products is to select temperature parameters of the process and the cooling schedule, ensuring the formation of the required structure and properties of finished products. At the same time, the issue of predicting the temperature state of steel and achieving the specified treatment parameters in industrial conditions remains relevant. **Objective.** The research is aimed at selecting the accelerated cooling process schedule for coils based on the simulation of the thermal state of steel along the strip section. **Methods Applied.** Modeling was carried out in the Deform-3D software suite. The authors used in the research their finite element model developed for calculating the thermal field during controlled rolling and accelerated cooling of steel on hot strip mill 2000. The model factors into the processes of heat release during rolling, heat transfer to the rolls, as well as cooling of steel, when in contact with water and air. **Results.** The authors proposed a finite element model used to predict the cooling rate and the distribution of the temperature field along the section of rolled products. Having analyzed the results of finite element modeling, the authors selected a cooling schedule providing for enabling of the first 19 sections of the unit in a sequential order. This contributes to achieving the required treatment schedules subject to the design features of the operating equipment. The experimental industrial tests showed high convergence of calculated and experimental data. An error of the obtained data does not exceed 3%.

Keywords: Deform-3D, coils, accelerated cooling unit, cooling schedule, temperature field, cooling rate

The research was conducted at Nosov Magnitogorsk State Technical University and funded by the Ministry of Education and Science of Russia as part of the integrated project aimed at organizing high-technology production facilities (Agreement No. 075-11-2021-063 dated June 25, 2021).

For citation

Alekseev D. Yu., Emaleeva D.G., Kuznetsova A.S., Gulin A.E., Adishchev P.G., Tetyushin K.P. Selecting an Accelerated Cooling Schedule for Low-Alloy Steel Coils Based on Finite Element Modeling. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 4, pp. 63-69. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-63-69>

Введение

В современных условиях процесс контролируемой прокатки с ускоренным охлаждением широко используется в мировой практике прокатного производства. При разработке технологических режимов и освоении производства инновационных видов проката одной из важнейших научно-практических задач является выбор температурных параметров процесса и схемы охлаждения, обеспечивающих формирование требуемой структуры и свойств готовой продукции. Вместе с тем в связи с конструктивными особенностями установок ускоренного охлаждения (УУО) остается актуальной проблема прогнозирования температурного состояния металла и достижения заданных температурных параметров обработки в промышленных условиях. К примеру, в условиях широкополосного стана горячей прокатки (ШСП) 2000 ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ПАО «ММК») температура проката регистрируется пирометрами на следующих участках (рис. 1):

- на выходе из последней чистовой прокатной клетки;
- после участка №1 установки ускоренного охлаждения перед моталкой;
- после участка №2 установки ускоренного охлаждения перед моталкой.

Температуры, регистрируемые пирометрами на поверхности проката, могут существенно отличаться от температур, формируемых в процессе охлаждения по сечению металла. С целью теоретического исследования температурного поля по сечению проката целесообразно применить методы, основанные на решении уравнений теплового баланса [1-4]. Одним из многочисленных программных продуктов, позволяющих реализовать рассматриваемый подход, является программный комплекс Deform-3D [5-8].

В связи с вышеизложенным целью работы является выбор схемы процесса ускоренного охлаждения рулонного проката на основе моделирования теплового состояния металла по сечению полосы.

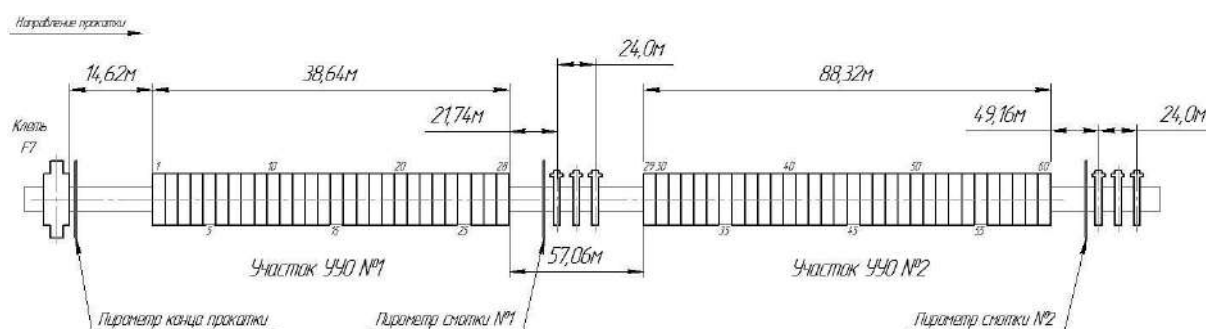


Рис. 1. Схема установки ускоренного охлаждения широкополосного стана горячей прокатки 2000

Fig. 1. The accelerated cooling unit of hot strip mill 2000

Теория, материалы и методы исследования

В ходе исследования использована предложенная авторами конечно-элементная модель расчета теплового поля при контролируемой прокатке и ускоренном охлаждении рулонного проката из низколегированной стали [9]. Модель учитывает процессы тепловыделения при прокатке стали, теплоотдачу валкам, а также охлаждение металла при контакте с водой и воздухом.

Моделирование выполнено для проката из низколегированной стали на основе C-Mn-Cr-Nb-Ti. Реологические свойства заготовки задавались в виде кривых упрочнения с учетом температуры, скорости и степени деформации. Режимы охлаждения приведены в табл. 1.

Таблица 1. Режимы ускоренного охлаждения исследуемой стали

Table 1. Accelerated cooling schedules for steel under study

Температура, °C		Скорость ускоренного охлаждения $V_{\text{охл}}$, °C/c
начала ускоренного охлаждения $T_{\text{КП}}$	конца ускоренного охлаждения $T_{\text{СМ}}$	
880	550	25

Основные принципы и допущения:

- геометрические размеры заготовки: 8×2×200 мм;
- температура охлаждающей воды составляла 20°C;
- тип объекта: вязкопластичный.

УУО была разделена на 6 последовательных участков, характеризующихся различными условиями охлаждения (слева направо на рис. 1):

- участок №1, граничащий с началом первой секции охлаждения;
- участок №2, совпадающий с участком УУО №1;
- участки №3 и 4, расположенные в пространстве между участками УУО №1 и УУО №2 и раз-

ленные пирометром смотки №1;

- участок №5, совпадающий с участком УУО №2;
- участок №6 между участком УУО №2 и пирометром смотки №2.

Для каждого участка рассчитаны коэффициенты теплоотдачи $\alpha_{\text{УО}}$ [10]:

$$\alpha_{\text{УО}} = k \cdot d_c^{0,719} \cdot \lambda_{\text{в}} \times \left[v_{\text{в}} \cdot \left(1 + 0,0337 t_{\text{в}} + 0,000221 t_{\text{в}}^2 \right) \right]^{1,719} \cdot \left(\frac{100 - t_{\text{в}}}{t_{\text{п}} + 273} \right)^{0,964},$$

где k – эмпирический коэффициент; d_c – диаметр сопла, м; $\lambda_{\text{в}}$ – коэффициент теплопроводности воды, Вт/(м·К); $v_{\text{в}}$ – скорость течения воды, м/с; $t_{\text{в}}$ – температура воды, °C; $t_{\text{п}}$ – температура полосы, °C.

Учитывалось, что при охлаждении металла формируются три основные области:

1. Область соударения воды с полосой, характеризующаяся высокими значениями $\alpha_{\text{УО}}$.
2. Область пленочного кипения, для которой $\alpha_{\text{УО}}$ рассчитывались как теплоотдача через слой пара $\alpha_{\text{пар}}$.
3. Участки, свободные от воды, характеризующиеся коэффициентами теплоотдачи на воздухе $\alpha_{\text{возд}}$.

Значения рассмотренных коэффициентов представлены в табл. 2.

Результаты исследования и их обсуждение

На первом этапе исследования были смоделированы две типовые схемы процесса ускоренного охлаждения полосы, используемые в условиях ШСПП 2000 ПАО «ММК». Количество и порядок включения секций установки ускоренного охлаждения, а также полученные расчетные значения скоростей охлаждения $V_{\text{расч}}$, °C/c, представлены на рис. 2.

Таблица 2. Значения коэффициентов теплоотдачи при различной температуре полосы

Table 2. Heat exchange coefficients at various strip temperatures

Коэффициент	Значение коэффициента теплоотдачи $\alpha_{\text{УО}}$, кВт/(м ² ·К), при температуре полосы, °C									
	30	110	200	300	400	500	600	700	800	990
$\alpha_{\text{возд}}$	0,020	0,020	0,020	0,021	0,023	0,027	0,031	0,038	0,046	0,067
$\alpha_{\text{пар}}$	–	0,299	0,285	0,285	0,286	0,289	0,292	0,297	0,303	0,319
$\alpha_{\text{УО}}$	5,29	4,22	3,45	2,86	2,45	2,15	1,91	1,72	1,56	1,34

Т _{КП} , °С	V _{прокатки} , м/с	Участок №1 установки ускоренного охлаждения																															
		Верх																															
880	4,53	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28				
		1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0				
		1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28				
Низ																																	
Участок №2 установки ускоренного охлаждения																																Т _{см} , °С	V _{расч} , °С/с
Верх																																	
29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60		
1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60		
Низ																																	

a

Т _{КП} , °С	V _{прокатки} , м/с	Участок №1 установки ускоренного охлаждения																															
		Верх																															
880	4,53	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28				
		1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0				
		1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28				
		Низ																															
Участок №2 установки ускоренного охлаждения																														Т _{см} , °С	V _{расч} , °С/с		
Верх																																	
29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58			59	60
1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	
1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	
29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60		
Низ																																	

6

Рис. 2. Исследуемые схемы включения секций установки ускоренного охлаждения: а – схема №1;

б – схема №2 (0 – полусекция выключена, 1 – полусекция включена)

Fig. 2. The studied schedules of enabling the sections of the accelerated cooling unit: a is schedule No. 1;

6 is schedule No. 2 (0 is the disabled half-section, 1 is the enabled half-section)

Как следует из **рис. 2**, расчетные скорости охлаждения центральной области заготовки составила для схемы №1 – 9,9°С/с, для схемы №2 – 11,9°С/с. Таким образом, применение типовых схем включения секций УУО не обеспечило достижение заданной скорости охлаждения в центральной области полосы ($V_{\text{охл}} = 25,0^\circ\text{С/с}$). В связи с этим была предложена новая схема охлаждения №3, предусматривающая последовательное включение в работу первых 19-ти секций охлаждения (**рис. 3**).

В результате моделирования схемы №3 получено, что расчетное значение скорости охлаждения центральной области проката составило $25,9^{\circ}\text{C}/\text{с}$, что соответствует заданным режимам обработки.

Расчетные кривые охлаждения центральной области полосы представлены на **рис. 4**.

Как следует из **рис. 4**, при использовании схем №1 и 2 требуемое значение температуры конца ускоренного охлаждения достигается в первой половине

участка №2 УУО. В связи с конструктивными особенностями оборудования в температурном интервале 700-680°C для схемы №1 и 660-645°C для схемы №2 охлаждение водой прерывается. Дальнейшее охлаждение происходит на воздухе со скоростью порядка 1,5°C/с.

При охлаждении заготовки по схеме №3 кривая изменения температуры центральной области проката имеет близкий к линейному характер. На выходе из последней включенной секции УУО температура металла составляет 600°C. В дальнейшем скорость охлаждения снижается, а достижение требуемой температуры конца ускоренного охлаждения происходит на выходе из участка №1 УУО. Выбранная схема №3 включения секций была рекомендована для проведения опытно-промышленного эксперимента в условиях ШСГП 2000 ПАО «ММК». В ходе сравнения экспериментальных и расчетных значений установлено, что погрешность полученных данных не превышает 3%.

Т _{КП} , °С	V _{прокатки} , м/с	Участок №1 установки ускоренного охлаждения																															
		Верх																															
880	4,53	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28				
		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28				
		Низ																															
Участок №2 установки ускоренного охлаждения																												Т _{см} , °С	V _{расч} , °С/с				
Верх																																	
29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56			57	58	59	60
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0
29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60		
Низ																																	

Рис. 3. Схема №3 включения секций установки ускоренного охлаждения (0 – полусекция выключена, 1 – полусекция включена)

Fig. 3. Schedule No. 3 of enabling the sections of the accelerated cooling unit (0 is the disabled half-section; 1 is the enabled half-section)

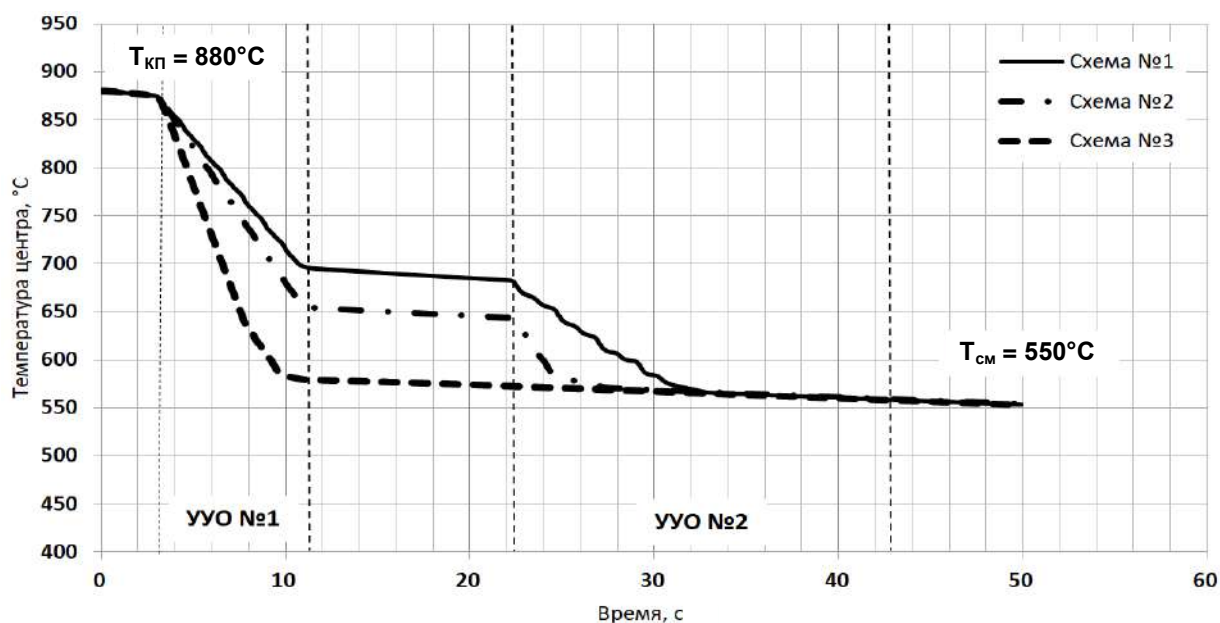


Рис. 4. Температура центра полосы при ускоренном охлаждении по схемам № 1-3

Fig. 4. Strip center temperature during accelerated cooling according to schedules No. 1-3

Заключение

В результате моделирования исследуемого процесса в программном комплексе Deform-3D выбрана схема ускоренного охлаждения рулонного проката, обеспечивающая достижение требуемых параметров обработки с учетом конструктивных особенностей ШСП 2000 ПАО «ММК».

Список литературы

1. Подкустов В.П., Алексеев П.Л. Определение температурного поля проката // Известия вузов. Черная металлургия. 1999. №9. С. 40-42.
2. Определение температурного поля раската в процессе прокатки на четырехвалковом стане / Пржигода М., Редр М., Томан З. и др. // Известия вузов. Черная металлургия. 1979. № 5. С. 56-60.
3. Catectoid steel // Materials Today: Proceedings, 2022, part 5, vol. 50, pp. 2241-2248.
4. FEM simulation of quenching process and experimental verification of simulation results / Huiping L., Guoqun Z., Shanting N., Chuazhen H. // Materials Science and Engineering: A. 2007, vol. 452-453, pp. 705-714.
5. Моделирование процесса охлаждения при закалке листовой стали в условиях толстолистового стана

- 5000 / Полецков П.П., Алексеев Д.Ю., Гулин А.Е. и др. // Черные металлы. 2023. №2. С. 33-37.
8. Анализ схем охлаждения листового проката на основе компьютерного моделирования / Полецков П.П., Алексеев Д.Ю., Кузнецова А.С., Гулин А.Е., Емалеева Д.Г., Адищев П.Г. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №4. С. 102-109.
 9. Разработка конечно-элементной модели расчета теплового поля рулонного проката в процессе термомеханической обработки / Алексеев Д.Ю., Гулин А.Е., Емалеева Д.Г. и др. // Черные металлы. 2022. №5. С. 55-60.
 10. Fundamental of momentum, heat and mass transfer / Welty J.R., Wicks C.E., Wilson R.E., Rorrer G.L. // 5th Edition. New York: J. Wiley & Sons Inc., 2007. 729 p.
 4. Nanba S., Kitamura M., Shimada M. et al. Prediction of microstructure distribution in the trough-thickness direction during and after hot rolling in carbon steels. *ISIJ International*. 1992;40(10):1013-1018.
 5. Srivastava A., Sinha A., Verma S. A mini-review on numerical approach of microstructure prediction in eutectoid steel. *Materials Today: Proceedings*. 2022;50(5):2241-2248.
 6. Huiping L., Guoqun Z., Shanting N., Chuanzhen H. FEM simulation of quenching process and experimental verification of simulation results. *Materials Science and Engineering: A*. 2007;452-453:705-714.
 7. Poletskov P.P., Alekseev D.Yu., Gulín A.E. et al. Simulation of the cooling process during hardening of steel plates on plate mill 5000. *Chernye metally* [Ferrous Metals]. 2023;(2):33-37. (In Russ.)
 8. Poletskov P.P., Alekseev D.Yu., Kuznetsova A.S., Gulín A.E., Emaleeva D.G., Adishchev P.G. Analysis of simulated plate cooling schedules. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022;20(4):102-109. (In Russ.)
 9. Alekseev D.Yu., Gulín A.E., Emaleeva D.G. et al. Development of a finite element model for calculating the thermal field of coils in the thermomechanical process. *Chernye metally* [Ferrous Metals]. 2022;(5):55-60. (In Russ.)
 10. Welty J.R., Wicks C.E., Wilson R.E., Rorrer G.L. Fundamental of momentum, heat and mass transfer. 5th Edition. New York: J. Wiley & Sons Inc., 2007, 729 p.

References

Поступила 17.07.2023; принята к публикации 14.08.2023; опубликована 25.12.2023
Submitted 17/07/2023; revised 14/08/2023; published 25/12/2023

Алексеев Даниил Юрьевич – инженер инжинирингового центра НИС, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: d.u.alekseev@mail.ru.

Емалеева Динара Гумаровна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник инжинирингового центра НИС, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: emaleevadg@mail.ru. ORCID 0000-0002-2217-180X

Кузнецова Алла Сергеевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник инжинирингового центра НИС, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: allakuznetsova.mgtu@mail.ru.

Гулин Александр Евгеньевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник инжинирингового центра НИС, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: a.gulin@magtu.ru. ORCID 0000-0002-7722-4112

Адищев Павел Геннадьевич – аспирант, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: adishev2015@yandex.ru.

Тетюшин Кирилл Павлович – аспирант, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.

Daniil Yu. Alekseev – Engineer of the Engineering Center of the Research and Innovation Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: d.u.alekseev@mail.ru.

Dinara G. Emaleeva – PhD (Eng.), Senior Researcher of the Engineering Center of the Research and Innovation Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: emaleevadg@mail.ru. ORCID 0000-0002-2217-180X

Alla S. Kuznetsova – PhD (Eng.), Senior Researcher of the Engineering Center of the Research and Innovation Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: allakuznetsova.mgtu@mail.ru.

Aleksandr E. Gulin – PhD (Eng.), Senior Researcher of the Engineering Center of the Research and Innovation Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: a.gulin@magtu.ru. ORCID 0000-0002-7722-4112

Pavel G. Adishchev – postgraduate student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: adishev2015@yandex.ru.

Kirill P. Tetyushin – postgraduate student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

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

УДК 669.14.018.291.3:621.785:693.554

DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-4-70-80



ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АРМАТУРНОГО ПРОКАТА В БУНТАХ ИЗ ДВУХ- И МУЛЬТИФАЗНОЙ СТАЛИ

Сычков А.Б.¹, Нестеренко А.М.², Завалищин А.Н.¹, Моллер А.Б.¹, Кулаков Б.А.³, Шубин И.Г.¹

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

² Институт черной металлургии НАН Украины, Днепр, Украина

³ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Актуальность и цель исследования. В настоящее время (до недавнего времени) в России существовало несколько нормативных документов (ГОСТ), нормирующих химический состав, геометрические параметры и технические требования к арматурному прокату в прутках и бунтах, а также способу производства (горячая прокатка, горячая прокатка с последующим термическим упрочнением в потоке сортовых станков с использованием тепла предпрокатного нагрева, холодная прокатка и/или волочение горячекатаных заготовок) таких изделий разных классов прочности, специальных технологических свойств (свариваемость, сопротивление усталостным нагрузкам, сейсмостойкость и т.п.). Поэтому, учитывая опыт передовых промышленных стран, например европейский стандарт EN 10138, в России разработан и внедряется с 2018 года стандарт аналогичного класса – ГОСТ 34028-2016. Согласно требованиям указанных стандартов, выбор технологии изготовления арматуры определяет изготовитель. При этом необходимо учитывать выполнение требований заказчика к параметрам и свойствам арматуры с обеспечением высокого уровня служебных, эксплуатационных характеристик металлопродукции. Целью настоящих исследований является решение актуальной задачи обеспечения противоречивых комплексов свойств с минимальными затратами. **Цель работы.** Формирование микроструктуры и механических свойств арматурного проката в бунтах из двух- и мультифазной стали. **Результаты.** Исследованы режимы контролируемой прокатки на проволочной линии промышленного мелкосортно-проволочного прокатного стана, направленные на получение арматурного проката номинальным диаметром 6 мм периодического профиля в бунтах с двух(ферритно-мартенситной (бейнитной)-) и мультифазной (ферритно-мартенситно(бейнитно)-перлитной) структурой из марганцево-кремнистой низколегированной стали марки 18Г2С, микролегированной ванадием. Установлено, что показатели высоких прочностных и пластических свойств арматурного проката диаметром 6 мм в бунтах из исследованной стали $\sigma_t = 530-550$ МПа, $\sigma_b = 785-885$ МПа, $\delta_5 = 15,0-29,0\%$, полностью отвечающие требованиям стандартов для арматурного проката повышенной прочности, достигаются в случае режимов с температурами виткообразования $T_{во}$ в интервале 1020-1060°C, при которых в стали обеспечивается формирование особой мультифазной (ферритно-мартенситно(бейнитно)-перлитной) структуры. **Выводы.** Определены режимы контролируемой прокатки на проволочной линии промышленного сортового прокатного стана, обеспечивающие получение арматурного проката диаметром 6 мм (№6) периодического профиля в бунтах с двух- и мультифазной структурой из марганцево-кремнистой низколегированной стали марки 18Г2С, микролегированной ванадием. Установлено, что показатели высоких прочностных и пластических свойств арматурного проката №6 достигаются в случае режимов с температурами $T_{во}$ в интервале 1020-1060°C, при которых в стали формируется мультифазная структура.

Ключевые слова: арматурный бунтовой прокат, химический состав стали, термомеханическое упрочнение, микролегирование, ванадий, контролируемая прокатка, двух- и мультифазная структура, линия «Стелмор», феррит, перлит, бейнит, мартенсит, технологические параметры-режимы

© Сычков А.Б., Нестеренко А.М., Завалищин А.Н., Моллер А.Б., Кулаков Б.А., Шубин И.Г., 2023

Для цитирования

Формирование микроструктуры и механических свойств арматурного проката в бунтах из двух- и мультифазной стали / Сычков А.Б., Нестеренко А.М., Завалищин А.Н., Моллер А.Б., Кулаков Б.А., Шубин И.Г. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №4. С. 70-80. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-70-80>



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

FORMATION OF A MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF DUAL- AND MULTI-PHASE REINFORCING STEEL IN COILS

Sychkov A.B.¹, Nesterenko A.M.², Zavalishchin A.N.¹, Moller A.B.¹, Kulakov B.A.³, Shubin I.G.¹

¹ Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

² Institute of Ferrous Metallurgy of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine

³ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Relevance and Objectives. Until recently, in Russia there were several regulatory documents (GOST) specifying the chemical composition, geometric parameters and technical requirements for reinforcing steel in bars and coils, as well as the production method (hot rolling, hot rolling with subsequent thermal hardening in the line of section mills using heat of pre-rolling heating, cold rolling and/or drawing of hot rolled rods) of such products of different strength classes, special technological properties (weldability, resistance to fatigue loads, seismic resistance, etc.). Therefore, given the experience of advanced industrial countries, for example, European Standard EN 10138, since 2018, GOST 34028-2016, a developed standard of a similar class, has been implemented in Russia. According to the requirements of these standards, the production method of reinforcing steel is determined by manufacturers. It is necessary to comply with customer requirements for the parameters and properties of reinforcing steel and ensure a high level of service and operational characteristics of steel products. This research is aimed at solving the currently relevant issue of providing contradictory sets of properties at minimal costs. **Objectives.** Formation of a microstructure and mechanical properties of dual- and multi-phase reinforcing steel in coils. **Results.** This paper examines controlled rolling modes on a wire line of an industrial bar and wire rolling mill aimed at producing deformed reinforcing steel bars with a nominal diameter of 6 mm in coils with a dual- (ferrite-martensite(bainite)) and multi-phase (ferrite- martensite (bainite)-pearlite) structure from manganese-silicon low-alloy steel grade 18G2S, microalloyed with vanadium. It has been established that the indicators of high strength and ductility of reinforcing bars with a diameter of 6 mm in coils from steel under study ($\sigma_T = 530-550$ MPa; $\sigma_B = 785-885$ MPa; $\delta_5 = 15.0-29.0\%$), fully meeting the requirements of the standards for high-strength reinforcing steel, are achieved at coil formation temperatures T_{bo} in the range of 1020-1060°C, providing the formation of a special multi-phase (ferrite-martensite(bainite)-pearlite) steel structure. **Conclusions.** The authors determined modes of controlled rolling on the wire line of an industrial bar rolling mill, ensuring the production of deformed reinforcing steel bars with a diameter of 6 mm (No. 6) in coils with a dual- and multi-phase structure from manganese-silicon low-alloy steel grade 18G2S, microalloyed with vanadium. It has been established that indicators of high strength and ductility of reinforcing bars No. 6 are achieved at temperatures T_{bo} in the range of 1020-1060°C, entailing a formation of a multi-phase structure.

Keywords: reinforcing steel in coils, chemical composition of steel, thermomechanical hardening, microalloying, vanadium, controlled rolling, dual- and multi-phase structure, Stelmor line, ferrite, pearlite, bainite, martensite, technological parameters-modes

For citation

Sychkov A.B., Nesterenko A.M., Zavalishchin A.N., Moller A.B., Kulakov B.A., Shubin I.G. Formation of a Microstructure and Mechanical properties of Dual- and Multi-Phase Reinforcing Steel in Coils. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 4, pp. 70-80. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-70-80>

Введение

В настоящее время в РФ действует новый стандарт на технические требования к арматурному прокату широкого назначения – ГОСТ 34028-2016, заменяющий ряд старых стандартов, таких как ГОСТ 5781, ГОСТ 10884, ГОСТ 52544, СТО АСЧМ 7-93 и другие нормативные документы (НД), нормирующие химический состав и свойства горячекатаной, термически упрочняемой и холоднодеформированной арматуры. В этом направлении анализируемый ГОСТ 34028 подобен такому европейскому НД, как EN 10138 с унификацией требований к арматурному прокату всех

видов производства. ГОСТ 34028 включает в себя технические требования к арматурному прокату разных классов прочности – от 400 до 800 (1000) МПа по пределу текучести. Способ производства арматуры выбирает ее изготовитель. Наиболее ответственная продукция – свариваемая, коррозионноустойчивая, для использования в сейсмоопасных регионах, метро и т.п. – может быть произведена термомеханическим упрочнением или в горячекатаном состоянии при помощи микролегирования, например ванадием. При этом обеспечивается сочетание высоких значений прочностных и пластических характеристик металла, хладостойкости за счет получения мелкого действи-

тельного зерна в результате дисперсионного твердения или зернограницного упрочнения, высокой устойчивости к усталостным и знакопеременным нагрузкам. Недостатком микролегирования стали является высокая дороговизна легирующих элементов, в частности ванадия. Следует отметить, что примерно одинаковые свойства арматуре можно обеспечить и термомеханическим упрочнением, в том числе термоциклированием и микролегированием и т.п. [1, 2].

Благодаря уникальному сочетанию прочностных и пластических свойств высокопрочные двух- и мультифазные низколегированные стали успешно используются для снижения массы деталей автомобилей и машин, изготавливаемых методами холодной штамповки и высадки, для изготовления труб высокого давления в магистральных нефте- и газотранспортных системах, в том числе в сейсмических зонах и районах вечной мерзлоты [1-4]. Помимо этого, обширной сферой применения арматурного проката из двух- и мультифазных высокопрочных сталей в последние годы стала строительная индустрия.

В современной технологии изготовления сборного железобетона, интенсивно развивающейся в последние годы, для армирования в значительных объемах (до 50% от общей потребности арматурной стали) предусматривается применение арматурного проката периодического профиля до 12 мм в бунтах [5]. Достоинством арматурного проката в бунтах является его высокая эффективность при переработке на автоматизированных производствах при изготовлении арматурных сеток, каркасов, закладных изделий для армирования железобетона, практическое отсутствие отходов при заготовительных операциях. При использовании же стержневого арматурного проката образуются отходы в немерных длинах в объеме не менее 5-7%. Потребность строительной индустрии в арматурном прокате в бунтах очень высока (до 90% от общей потребности в арматурном прокате периодического профиля диаметром до 12 мм). Исходя из вышеизложенного, представляется актуальным проведение исследования, направленного на изучение структурных параметров и комплекса механических характеристик арматурного проката периодического профиля в бунтах из двух- и мультифазной низколегированной стали, полученного по режимам термомеханической обработки (ТМО) с контролируемым охлаждением (контролируемая прокатка) непосредственно на проволочной линии промышленного сортового прокатного стана.

Принципиально для получения двух- и мультифазных структур в прокате из низколегированных сталей, согласно данным работы [3], используются две схемы технологических режимов: термическая и ТМО с контролируемым охлаждением – контролируемая прокатка (рис. 1).

Схема термической обработки (слева на рис. 1) предусматривает операции нагрева стали до температуры 1063 K (790°C) двухфазной (α - γ)-области (межкритический интервал температур (МКИТ)), выдержки с определенной длительностью при этой темпера-

туре, заковки в воду для получения упрочняющих сталь участков – островков мартенситной фазы в структуре и последующего отпуска при температуре (773-823)K (500-550°C) для снижения уровня напряжений и склонности стали к старению. Многочисленные вариации режимов термической обработки, подобные вышеописанной, используются в агрегатах непрерывного отжига для массового промышленного производства холоднокатаного листового проката из низколегированных сталей с двух- и мультифазной структурой. Схема ТМО, завершающей стадией которой является контролируемое охлаждение горячекатаного проката, приведена в правой части рис. 1. Схематическое наложение положения линий фазовых превращений аустенита низколегированной стали (термокинетическая диаграмма (ТКД)) в интервале температур контролируемого охлаждения показывает, что в данном случае упрочняющие сталь островки мартенситной фазы (мартенситной и перлитной фаз) в структуре низкоуглеродистой стали в объемах 15-20%, обеспечивающие наиболее высокие значения прочности и твердости ($HV = 371$ – рис. 1), формируются из микроучастков аустенита (γ -фазы), оставшихся непревращенными в этой стали при температуре 873 K (600°C) после полного завершения $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения в результате заковки в воду.

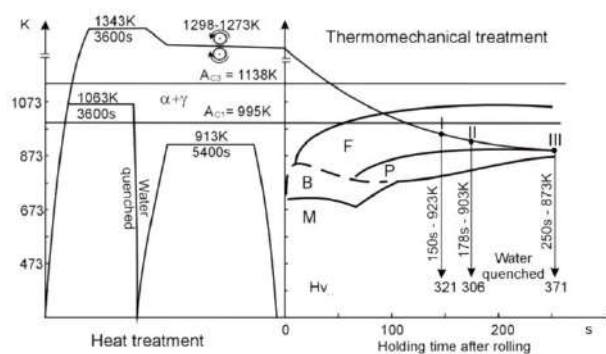


Рис. 1. Схематическое изображение режимов термической обработки и контролируемой прокатки для получения двух- и мультифазных структур в прокате из низколегированных сталей [3]: water quenched – водяная заковка; heat treatment – термическая обработка; thermomechanical treatment – термомеханическая обработка; holding time after rolling – время выдержки после прокатки; F – феррит; P – перлит; B – бейнит; M – мартенсит; HV = HB – твердость по Виккерсу и Бринеллю соответственно

Fig. 1. Schematic representation of heat treatment and controlled rolling modes for obtaining two- and multiphase structures in rolled low-alloy steels [3]: water quenched, heat treatment, thermomechanical treatment, holding time after rolling holding time after rolling, F – ferrite, P – pearlite, B – bainite, M – martensite, HV=HB – Vickers and Brinell hardness, respectively

Разработке режимов контролируемой ТМО для массового производства высокопрочных и высокотехнологичных видов горячекатаного листового и сортового проката, катанки и арматурной проволоки из низколегированных сталей с двух- и мультифазной структурой посвящено большое количество исследований. В частности, в работе [6] при использовании режима ТМО, включающего горячую прокатку в МКИТ при температуре 845°C и охлаждение со скоростью выше 10°C/с, в катанке диаметром 6,5 мм из низкоуглеродистой стали (мас. %: 0,08 C; 1,8 Mn; 0,7 Si) получена двухфазная структура с размером ферритного зерна не менее 8,3 мкм и объемом мартенситной фракции 9-11%. Катанка из этой же стали, охлаждаемая непосредственно после горячей прокатки воздушными струями (другой режим, применённый в работе, – режим контролируемой ТМО), имела двухфазную структуру с зерном феррита 8,2 мкм и объёмной долей мартенситной фракции 11,5%. Уровень прочностных и пластических свойств полученного бунтового проката диаметром 6,5 мм с двухфазной структурой (предел текучести $\sigma_{0,2} = 335-345$ МПа, предел прочности $\sigma_b = 600-620$ МПа, низкие значения отношения $\sigma_{0,2}/\sigma_b = 0,54-0,56$, высокий уровень показателей пластичности (относительное удлинение $\delta_{10} = 26,5-31,5$ %) и коэффициента деформационного упрочнения ($n = 0,221$) предопределяют её успешное использование для операций холодной высадки ($n = \sigma_t(\text{после окончательной деформации})/\sigma_t(\text{начало процесса деформации})$).

Представляет интерес проведенное в работе [7] комплексное исследование перспективности использования в строительной индустрии катанки диаметром 5,5 мм из низкоуглеродистой стали, содержащей мас. %: 0,08 C; 0,77 Mn; 0,21 Si; 0,017 P; 0,012 S, с

двухфазной ферритно-мартенситной структурой. Двухфазную структуру в исследованных образцах катанки получали путём термической обработки, включающей выдержку образцов при температурах МКИТ (795, 810, 820 и 840°C) в течение 15 мин и последующую закалку в воду. Структурные параметры, твёрдость и механические свойства полученных образцов анализировали в сопоставлении с аналогичными данными для арматурной проволоки периодического профиля с холоднодеформационным рифлением из этой же стали (табл. 1).

Полученные данные позволили авторам работы [7] заключить, что близкий к серийно произведенной арматурной проволоке периодического профиля уровень прочностных свойств, отношения $\sigma_b/\sigma_{0,2}$, относительного удлинения δ_{10} , твёрдости HV наблюдается в деформированной растяжением катанке со значительной (50%) объёмной долей мартенситной фазы (класс прочности 820 МПа – 2% удл. (см. табл. 1)). Авторы утверждают также, что полученный материал характеризуется большей способностью к адсорбции энергии и более высоким значением экспоненты упрочнения по сравнению с традиционным, что определяет его значительную перспективу для использования в строительной индустрии в сейсмически опасных зонах.

Химические составы сталей, используемых для производства горячекатаного арматурного проката в бунтах, и показатели их механических свойств характеризуются определённым разнообразием. Арматурный прокат периодического профиля в бунтах класса прочности 300 (предел текучести $\sigma_{0,2} > 300$ Н/мм²) изготавливают из углеродистой стали, а класса 400 ($\sigma_{0,2} > 420$ Н/мм²) – из низколегированной стали (табл. 2, 3).

Таблица 1. Структурные параметры, твёрдость и механические свойства арматуры
Table 1. Structural parameters, hardness and mechanical properties of reinforcement

Образец	Объёмная доля мартенсита, %	Твёрдость, НВ	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Временное сопротивление разрыву σ_b , МПа	$\sigma_b/\sigma_{0,2}$	Относительное удлинение δ_{10} , %
Бунтовой прокат диаметром 5,5 мм	—	139±5	304	426	1,40	32,7
795*	25±5	184±1	333	656	1,97	14,9
810*	40±5	226±1	337	675	2,00	13,5
820*	50±5	252±8	356	693	1,95	12,5
840*	65±5	268±2	407	698	1,72	10,5
810 (2 % удлинение)***	40±5	227±2	588	689	1,17	12,7
820 (2 % удлинение)	50±5	261±4	633	698	1,19	9,5
ART500N	—	240±4	670	708	1,06	7,8
Стандартные требования	—	—	500**	550**	1,03**	6,0**

* Катанка с двухфазной структурой, цифрой обозначена температура выдержки в МКИТ, °C.

** Минимальное значение, не менее.

*** 2% удлинение при растяжении образца, как моделирование напряжённого состояния, установленного в стали после холоднодеформационного рифления поверхности арматуры.

Таблица 2. Механические свойства арматурного проката разных классов прочности
Table 2. Mechanical properties of reinforcing bars of different strength classes

Класс прочности проката, МПа	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %
300	≥ 300	≥ 420	$\delta_{200} \geq 11$
400	≥ 420	≥ 620	$\delta_{200} \geq 9$
400	390-510	≥ 560	$\delta_5 \geq 16$
500	490-625	≥ 620	$\delta_5 \geq 12$
400	392-510	≥ 559	$\delta_5 \geq 16$
500	490-528	≥ 618	$\delta_5 \geq 12$

Таблица 3. Химический состав стали арматурного проката разных классов прочности
Table 3. Chemical composition of reinforcing bars of different strength classes

Класс прочности проката, МПа	Массовая доля элементов, %, равно или не более						C _Σ , % не более	
	C	Mn	Si	S	P			
300	0,28-0,38	0,50-0,80	0,10	0,050	0,040	–		
400	0,32-0,38	0,80-1,20	0,60-0,90	0,045	0,040	–		
390	0,29	0,55	1,80	0,040	0,040	0,55		
490	0,32	0,55	1,80	0,040	0,040	0,60		
Класс проката	Массовая доля элементов, %, не более							C _Σ , %, не более
	C	Si	Mn	S	Cr	Ni	Cu	
400	0,29	0,55	1,80	0,050	0,15	0,15	0,30	0,55
500	0,29	0,55	1,80	0,050	0,15	0,15	0,30	0,60

Арматурный прокат периодического профиля в бунтах разных классов прочности изготавливается из низколегированных сталей одной марки. Регламентируется величина углеродного эквивалента C_{Σ} , который рассчитывается по выражению

$$C_{\Sigma} = C + \frac{Mn}{6}. \quad (1)$$

Материалы и техника исследований

Учитывая возрастающий спрос на арматурный прокат периодического профиля в бунтах с повышенной прочностью ($\sigma_{0,2} > 500$ МПа) [5], промышленные эксперименты на проволоочной линии сортового стана по разработке технологических режимов производства такой металлопродукции проводили с использованием низколегированной стали марки типа 18Г2С, микролегированной ванадием, а в качестве сравнительной использовали арматурный прокат из низкоуглеродистой стали марки СтЗГсп, микролегированной бором. Химические составы исследованных сталей представлены в **табл. 4**, а расположение технологического оборудования в хвостовой части проволоочной линии прокатного стана – на **рис. 2**.

Выбор ванадия в качестве микролегирующего элемента в низкоуглеродистой стали 18Г2С обусловлен его высокой нитридообразующей способностью в широком интервале температур (ΔT – от 1060-1080 до

400°С) при умеренных скоростях охлаждения сталей из аустенитной области [8-13]. То, что в начальных указанных температурных условиях согласно значениям свободной энергии Гиббса для исследуемых сталей образуются преимущественно нитриды ванадия, доказывается термодинамически [12, 13]. При этом, как известно [8], осуществляются механизмы дисперсионного упрочнения феррита сталей, способствующего повышению их прочностных свойств. Микродобавка бора вводилась в низкоуглеродистую сталь СтЗГсп с целью повышения её пластичности, поскольку роль бора, как «пластификатора» низкоуглеродистых и низколегированных сталей, убедительно показана в [15-18]. Кроме того, возможно, наряду с пластификацией свойств арматурного проката, обеспечить и повышение прокаливаемости/закаливаемости металла правильным подбором количества бора и отношения бора к азоту [14].

Таблица 4. Химический состав исследованных сталей
Table 4. Chemical composition of the studied steels

Марка стали	Содержание химических элементов, мас. %								
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	V	B
18Г2С	0,17	1,25	0,75	0,002	0,016	0,02	0,02	0,112	–
СтЗГсп	0,21	1,02	0,27	0,002	0,016	0,04	0,02	0,001	0,006

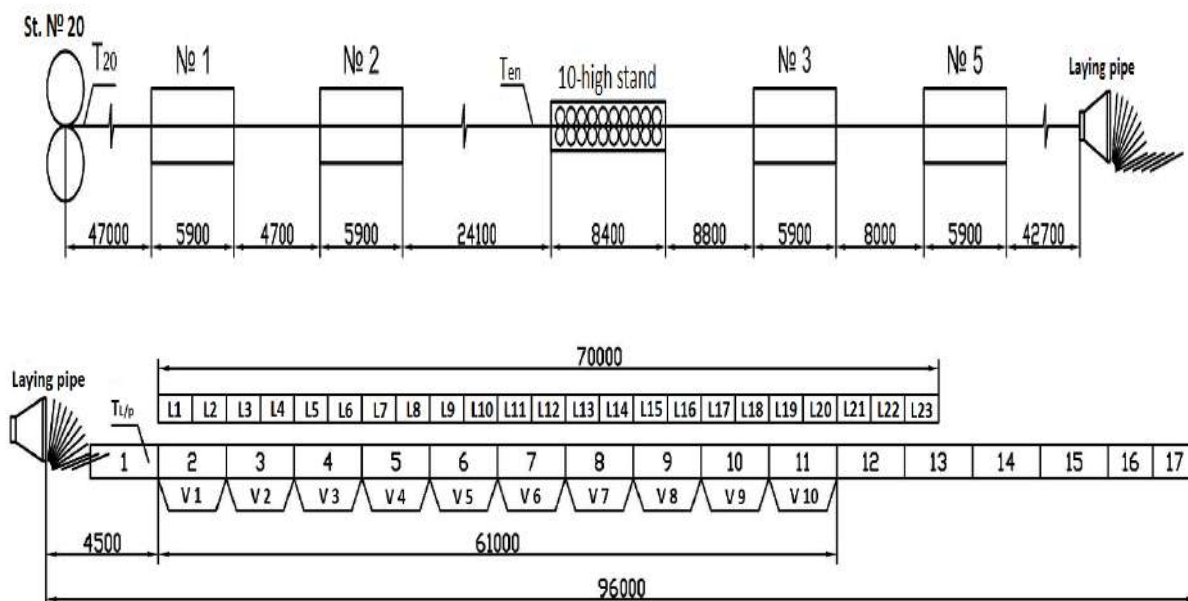


Рис. 2. Схема стандартной линии «Стелмор»: T_{20} – последняя – 20-я прокатная клеть; № 1-5 – секции водяного охлаждения; T_{en} – 10-клетевой проволочный блок; Laying pipe – виткообразователь (витковая труба); L1-L23 – теплоизолирующие крышки; 1-17 – секции транспортера витков; V1-V10 – дутьевые вентиляторы
 Fig. 2. Scheme of the standard Stelmor line: T_{20} – last – 20th rolling stand; No. 1-5 – water cooling sections; T_{en} – 10-cage wire block; Laying pipe – coil former (spiral pipe); L1-L23 – heat-insulating covers; 1-17 – coil conveyor sections; V1-V10 – blower fans

Нагрев полученных заготовок 150×150 мм из исследованной стали производили в ПШП стана. Температура нагрева по зонам печи: пятая – 1160-1165°C, шестая – 1145-1150°C, седьмая – 1110-1130°C. Средняя температура раскатов за клетью №20 – 1090°C.

Для реализации схемы ТМО с контролируемым охлаждением (контролируемой прокатки) (см. рис. 1, правая часть), обеспечивающей получение в готовом бунтовом арматурном прокате номинальным диаметром 6 мм (№6) из микролегированной ванадием стали 18Г2С двух- и мультифазных структур требуемого сочетания прочностных и пластических свойств, качества профилировки, проведены промышленные эксперименты с варьированием температуры металла на виткообразователе T_{bo} .

Для определения структурных составляющих арматурного бунтового проката использовали оптический и электронный сканирующий (растровый) микроскопы.

Результаты исследований и обсуждение

Проведенный микроструктурный анализ показал, что в арматурном бунтовом прокате №6 из исследованной низколегированной стали мультифазные (ферритно-перлитно-мартенситные) структуры формируются в случае технологических режимов 1(3) и 2(5) с повышенными значениями T_{bo} , а двухфазная (ферритно-мартенситная) – в случае режима 3(10) с более низким значением T_{bo} (рис. 3, табл. 5).

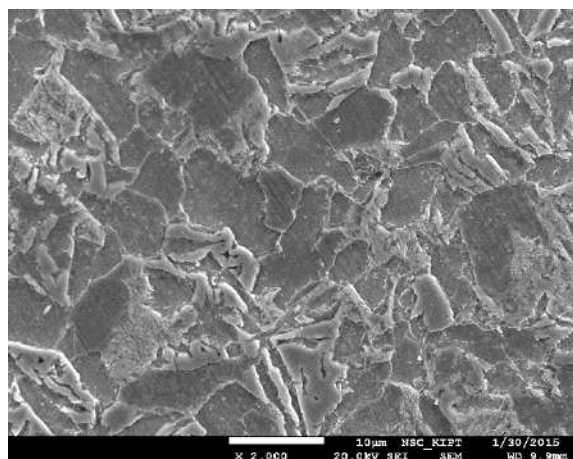
Для режимов 1(3), 2(5) и 3(10) достигается также и высокое качество нанесенного периодического профиля.

Удельная теплоёмкость железа (стали) составляет

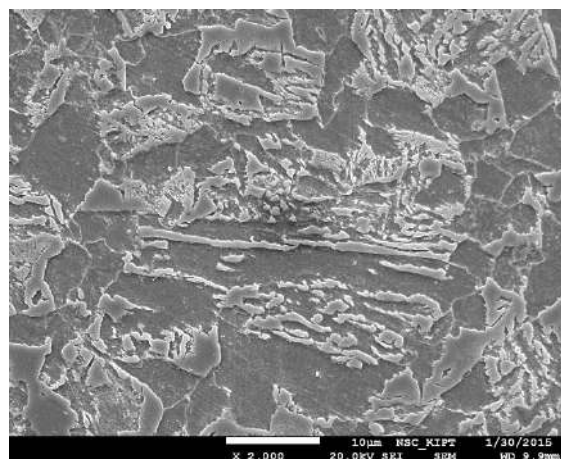
$c = 4,6 \cdot 10^2$ Дж/кг·К [19]. То есть для снижения температуры 1 кг стали на 1°C необходимо осуществить отвод $4,6 \cdot 10^2$ Дж теплоты. В наших экспериментах отвод теплоты от витков арматурного профиля, разложенных на транспортере «Стелмор», производился включёнными вентиляторами при открытых крышках транспортера (см. рис. 2, табл. 5), и для всех режимов обработки эти условия оставались неизменными. Поскольку при проведении экспериментов условия работы транспортера в плане контролируемого охлаждения арматурного проката №6 после ТМО оставались неизменными, то в случае режима 2(5) с $T_{bo} = 1060^\circ\text{C}$ необходима большая длительность отвода теплоты от витков арматурного профиля в ходе их охлаждения до температур фазовых превращений аустенита стали по сравнению с режимами, значения T_{bo} которых являются более низкими (см. табл. 5). Анализ термодинамической диаграммы (ТКД) фазовых превращений аустенита стали 15Г2С (рис. 4), химический состав которой очень близок для исследованной стали 18Г2С, показал, что структура стали (рис. 3, б, табл. 6) в случае режима 2(5) с $T_{bo} = 1060^\circ\text{C}$ формировалась путём реализации фазовых превращений аустенита, аналогичных к наблюдаемым вдоль кривой охлаждения, обозначенной цифрой 2(5). Особенности структуры стали в арматуре, полученной по режиму 1(3) с $T_{bo} = 1020^\circ\text{C}$ (рис. 3, а, табл. 6), свидетельствуют о том, что фазовые превращения аустенита осуществлялись вдоль кривой охлаждения, обозначенной цифрой 3 на ТКД на рис. 4. Двухфазная ферритно-мартенситная (бейнитная) структура в ар-

матуре из исследованной стали, полученная по режиму 3(10) (рис. 3, в, объёмная доля мартенсита (бейнита) составляет 21,10% (см. табл. 6), типична для ин-

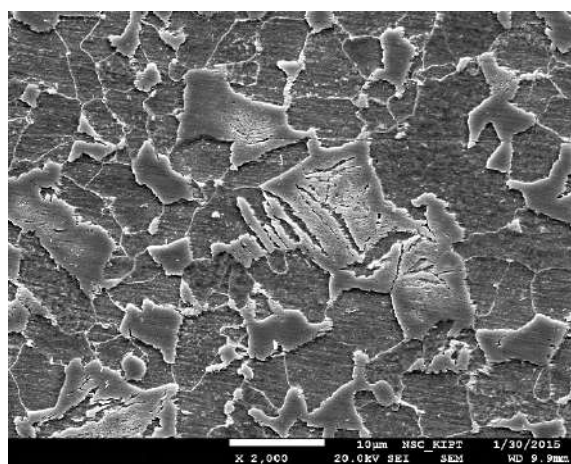
тервала скоростей охлаждения «бесперлитной области» на ТКД (соответствующая условная кривая охлаждения обозначена цифрой 3(10) на рис. 4).



а



б



в

Рис. 3. Микроструктура (растровая электронная микроскопия) бунтового арматурного профилированного проката №6 из микролегированной ванадием стали 18Г2С: а, б и в – обработка по технологическим режимам соответственно 1(3), 2(5) и 3(10). $\times 2000$

Fig. 3. Microstructure (scanning electron microscopy) of coiled deformed reinforcing steel bars No. 6 from vanadium microalloyed steel 18G2S: а, б and в are treatment according to technological modes 1(3), 2(5) and 3(10), respectively, $\times 2000$

Таблица 5. Технологические режимы обработки* и полученные механические свойства

Table 5. Technological treatment modes* and obtained mechanical properties

Марка стали	Номер режима (образца)	Расход воды, м ³ /ч	$T_{\text{во}}, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{\text{т}}, \text{МПа}$	$\sigma_{\text{в}}, \text{МПа}$	$\delta_5, \%$	Изгиб
18Г2С	1(3 на рис. 4)	53	1020	540	885	15,0	Удовлетворительно
				530	810	26,0	Удовлетворительно
	2(5 на рис. 4)	0 (охлаждение на воздухе)	1060	550	805	21,5	Удовлетворительно
				550	785	29,0	Удовлетворительно
	3(10 на рис. 4)	98	920	495	800	7,0	Удовлетворительно
				490	775	11,0	Удовлетворительно
Ст3Гсп	3.1	98	920	410	565	31,0	Удовлетворительно

* Для всех режимов: на транспортере «Стелмор» все крышки открыты, включены вентиляторы №1-5, 7-10.

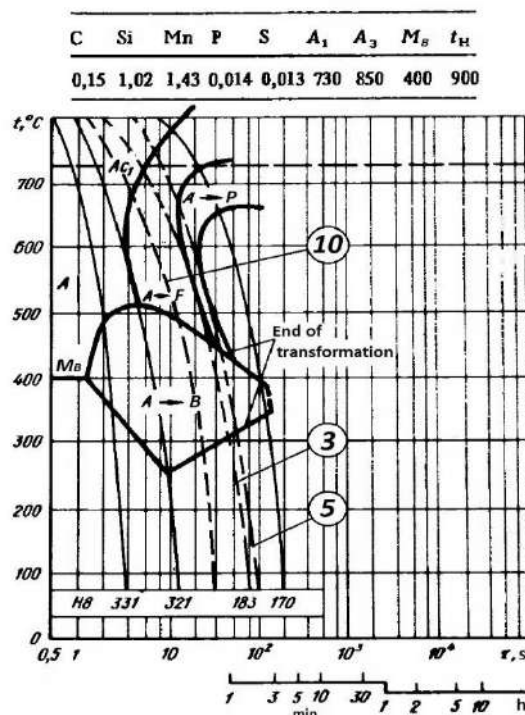


Рис. 4. Термокинетическая диаграмма фазовых превращений аустенита стали 15Г2С [20, 21] с условными кривыми охлаждения (пунктирные линии) для режимов обработки 1(3), 2(5) и 3(10)

Fig. 4. Thermokinetic diagram (CCE) of phase transformations of austenite in steel 15G2S [20, 21] with conditional cooling curves (dashed lines) for treatment modes 1(3), 2(5) and 3(10)

Таблица 6. Количественное соотношение составляющих и размер зерна феррита в структуре арматурного проката №6 из микролегированной ванадием стали 18Г2С

Table 6. Quantitative ratio of components and ferrite grain size in the structure of reinforcing steel bars No.6 from vanadium microalloyed steel 18G2S

Режим обработки ($T_{\text{во}}, ^\circ\text{C}$)	Объёмная доля фракции, %		Размер зерна феррита	
	Мартенсит (бейнит)	Перлит	Средний условный диаметр зерна d_L , мм	Номер зерна по ГОСТ 5639
1(3) (1020)	20,95	4,66	0,00465	12
2(5) (1060)	15,02	10,44	0,00423	12
3(10) (920)	21,10	—	0,00443	12

В арматурном бунтовом прокате №6 из сравнительной низкоуглеродистой стали СтЗГсп после обработки по режиму 3.1, параметры которого близки к таковым для режима 3(10) (см. табл. 5), формируется структура видманштетта с отчётливо различающимися иглами ферритной фазы и тёмными изолированными участками тонкодифференцированного перлита (рис. 5). Объёмные доли ферритных фракций в структуре – структурно-свободного феррита (ССФ с $d_L = 0,00510$ мм – 12-й номер по ГОСТ 5639) и игольчатого – в целом близки: $V_{\text{ССФ}} = 41,43$ и $V_{\text{ИФ}} = 46,17\%$. Объёмная доля изолированных перлитных участков невелика – $V_{\text{ИПУ}} = 12,40\%$, что в сочетании со значительным объёмом «мягких» ферритных фракций ($V_{\text{ССФ}} + V_{\text{ИФ}} = 86,7\%$) как раз и определяет в целом невысокий уровень прочностных свойств арматурно-

го проката №6, полученного из сравнительной стали (см. табл. 6).

Анализ ферритной структуры в арматуре из исследованных сталей показывает, что при контролируемом охлаждении в цикле ТМО с $T_{\text{во}}$ в интервале 920–1060°С в них формируется мелкое зерно 12-го номера по ГОСТ 5639 (см. табл. 6). Это благоприятный фактор в плане получения высоких показателей прочности полученного арматурного проката №6. Применительно к арматурному прокату №6 из микролегированной ванадием стали 18Г2С наиболее благоприятное соотношение упрочняющих фракций (мартенсита (бейнита) и перлита (см. рис. 3, 6, табл. 6) в её структуре и, соответственно, сочетание прочностных и пластических свойств достигается (см. табл. 5) в случае режима 2(5) с $T_{\text{во}} = 1060^\circ\text{C}$.

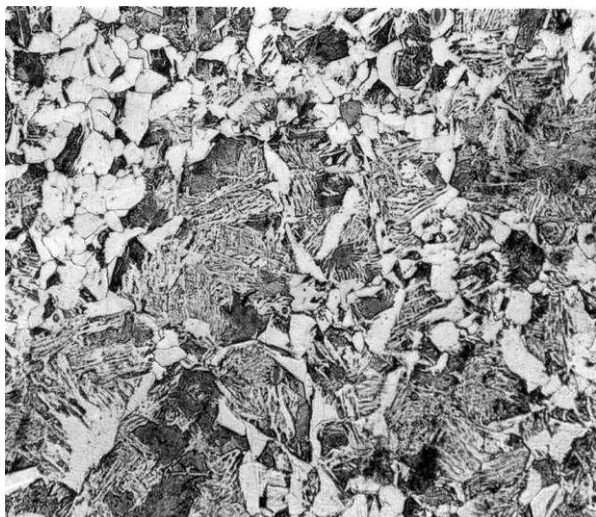


Рис. 5. Микроструктура участка средней зоны арматурного проката №6 из стали Ст3Гсп с бором (режим обработки 3.1 с $T_{\text{во}} = 920^{\circ}\text{C}$), $\times 800$

Fig. 5. Microstructure of the section of the middle zone of reinforcing steel bars No. 6 from steel St3Gsp with boron (treatment mode 3.1 at $T_{\text{во}} = 920^{\circ}\text{C}$), $\times 800$

При этом режиме обработки и даже в случае режима 1(3), несмотря на повышенную объёмную долю мартенситной фазы (23,95% (см. табл. 6, рис. 3, а), показатели прочностных свойств и пластичности арматурного проката №6 в бунтах из стали 18Г2С, микролегированной ванадием, превосходят требования, регламентируемые в стандартах для металлопроката соответствующих классов прочности (см. табл. 2). Вполне очевидно, что показатели прочности арматурного проката из этой стали обеспечиваются аддитивным вкладом зернограницного упрочнения, фазового упрочнения за счёт мартенсито-бейнитных и перлитных участков, а также дисперсионного упрочнения феррита мельчайшими выделениями нитридов ванадия.

Прочностные свойства и пластичность арматурного проката №6 в бунтах, полученного из сравнительной стали Ст3Гсп, микролегированной бором (см. табл. 6), соответствуют требованиям, регламентируемым в стандартах для металлопроката пониженной прочности: классов 400 и 500 соответственно (см. табл. 2).

Выводы

1. Определены режимы контролируемой прокатки на проволочной линии промышленного сортового прокатного стана, обеспечивающие получение арматурного проката диаметром 6 мм (№6) периодического профиля в бунтах с двух(ферритно-мартенситной (бейнитной))- и мультифазной (ферритно-мартенсито (бейнитно)-перлитной) структурой из марганцево-кремнистой низколегированной стали марки 18Г2С, микролегированной ванадием.

2. Установлено, что показатели высоких прочностных и пластических свойств арматурного проката

та №6 для арматурного проката повышенной прочности достигаются в случае режимов с температурами $T_{\text{во}}$ в интервале $1020\text{--}1060^{\circ}\text{C}$, при которых в стали формируется мультифазная структура.

Список источников

1. Сычков А.Б., Жигарев М.А., Перчаткин А.В. Технологические особенности производства арматурного проката широкого назначения. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2006. 499 с.
2. Поточная термическая обработка сортового и фасонного проката / А.Б. Сычков, М.А. Шекшеев, С.О. Малашкин, Г.Я. Камалова // Обработка сплошных и слоистых материалов. 2016. №2. С. 5-24.
3. Lis J., Lis A.K., Kolan C. Dual-phase technology and properties of C-Mn steels // Ynieria Materialowa. 2004, vol. 3, no. 140, pp. 163-165.
4. Xiurong, Zuo, Zhengyue Zhou Study of Pipeline Steels with Acicular Ferrite Microstructure and Ferrite-bainite Dual-phase Microstructure // Materials Research, 2015, vol. 18, no. 1, pp. 36-41.
5. Historical Data on Wire, Triangular Wire Fabric/ Mesh and Welded Wire Concrete Reinforcement (WWR). Wire Enforcement Institute (WRI). 2014. 9 p.
6. Xu X.J., Kong J.Q. Study on Cooling Process of Hot Rolled Wire Rod with Dual Phase Microstructure // Advanced Materials Research. 2012, vols. 415-417, pp. 779-783.
7. Application of dual phase steels in wires for reinforcement of concrete structures / H. Lorussoa, A. Burgueño, D. Egidia, H. Svoboda // Procedia Materials Science. 2012, no. 1, pp. 118-125.
8. Гольдштейн М.И., Грачёв С.В., Векслер Г.М. Специальные стали. М.: Металлургия, 1985. 408 с.
9. Study Structure and Properties Rolled Coils By V-Alloyed C-Mn-Si Steel with Dual- and Multi Phase Microstructures / V.L. Plyuta, S.A. Vorobey, G.V. Levchenko, A.B. Sychkov, A.M. Nesterenko // Journal of Material Science Research. 2017, vol. 6, no. 4, pp. 79-87.
10. Технология термической обработки арматурного и фасонного проката (теория и металлургическая практика): монография / А.Б. Сычков, Э.В. Парусов, А.Б. Моллер, О.Н. Тулулов, М.А. Шекшеев, А.Ю. Столяров, Г.Я. Камалова, Д.В. Назаров, С.О. Малашкин, М.В. Блохин. Маврикий: Parlarium academic publishing, 2017. 272 с.
11. Идентификация дефекта поверхности листового проката типа «вкатанная окалина» / А.Б. Сычков, Н.В. Копцева, Ю.Ю. Ефимова, А.В. Жлоба, Г.Я. Камалова // Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». 2018. №11. С. 72-76.
12. Сычков А.Б. Распознавание поверхностных дефектов листового проката при помощи микрорентгеноспектрального анализа / А.Б. Сычков, Н.В. Копцева, Ю.Ю. Ефимова, Г.Я. Атангулова (Камалова) // Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». 2021. Т. 77. №11. С. 1168-1176.

13. Уикс К.Е., Блок Ф.Е. Термодинамические свойства 65 элементов, их окислов, галогенидов, карбидов и нитридов. М.: Металлургия, 1965. 240 с.
14. Парусов В.В., Парусов О.В., Сычков А.Б. Прокат из борсодержащих сталей для высокопрочных крепежных изделий: монография. Днепропетровск: АРТ-Пресс, 2010. 160 с.
15. Wire rod of boron bearing low-carbon steel for direct deep drawing / V.V. Parusov, A.B. Sychkov, M.A. Zhigarev, A.V. Perchatkin // Metallurgist. 2004, vol. 48, iss. 11-12, pp. 626-634.
16. Парусов В.В., Сычков А.Б., Парусов Э.В. Теоретические и технологические основы производства высокоэффективных видов катанки. Днепропетровск: АРТ-Пресс, 2012. 376 с.
17. Новое применение бора в металлургии / В.В. Парусов, А.Б. Сычков, И.В. Деревянченко, М.А. Жигарев // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2005. №1 (9). С. 15-17.
18. Структура и свойства катанки для изготовления электродов и сварочной проволоки / А.Б. Сычков, В.В. Парусов, А.М. Нестеренко, С.Ю. Жукова, М.А. Жигарев, А.В. Перчаткин, А.В. Перегудов, И.Н. Чуйко. Бендеры: Полиграфист, 2009. 608 с.
19. Novikov I., Heinbucker B. Physics. Canada, Toronto/Vancouver: Irvin Publishing, 2001. 706 p.
20. Попова Л.Е., Попов А.А. Диаграммы превращения аустенита и бета-раствора в сплавах титана. М.: Металлургия, 1991. 503 с.
21. Попов А.А., Попов А.А. Справочник термиста. Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита. М.: Свердловск: Машгиз, 1961. 431 с.
22. rolled wire rod with dual phase microstructure. Advanced Materials Research. 2012;415-417:779-783.
23. Lorusso H., Burgueño A., Egidia D., Svoboda H. Application of dual phase steels in wires for reinforcement of concrete structures. Procedia Materials Science. 2012;(1):118-125.
24. Goldshtein M.I., Grachev S.V., Veksler G.M. *Spetsialnye stali* [Special steels]. Moscow: Metallurgiya, 1985, 408 p. (In Russ.)
25. Plyuta V.L., Vorobey S.A., Levchenko G.V., Sychkov A.B., Nesterenko A.M. Study structure and properties of rolled coils by V-alloyed C-Mn-Si steel with dual- and multi-phase microstructures. Journal of Material Science Research. 2017;6(4):79-87.
26. Sychkov A.B., Parusov E.V., Moller A.B., Tulupov O.N., Sheksheev M.A., Stolyarov A.Yu., Kamalova G.Ya., Nazarov D.V., Malashkin S.O., Blokhin M.V. *Tekhnologiya termicheskoy obrabotki armaturnogo i fasonnogo prokata (teoriya i metallurgicheskaya praktika): monografiya* [Technology of heat treatment of rebar and shaped steel (theory and metallurgical practice): monograph]. Mauritius: Palmarium Academic Publishing, 2017, 272 p. (In Russ.)
27. Sychkov A.B., Koptseva N.V., Efimova Yu.Yu., Zhloba A.V., Kamalova G.Ya. Identification of a surface defect of rolled sheets of the "rolled scale" type. *Byulleten nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii «Chernaya metallurgiya»* [Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information]. 2018;(11):72-76. (In Russ.)
28. Sychkov A.B., Koptseva N.V., Efimova Yu.Yu., Atangulova (Kamalova) G.Ya. Identification of surface defects in rolled sheets using X-ray microanalysis. *Byulleten nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii «Chernaya metallurgiya»* [Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information]. 2021;77(11):1168-1176. (In Russ.)
29. Wicks C.E., Block F.E. Thermodynamic properties of 65 elements – their oxides, halides, carbides and nitrides. Moscow: Metallurgiya, 1965, 240 p. (In Russ.)
30. Parusov V.V., Parusov O.V., Sychkov A.B. *Prokat iz borsoderzhashchikh staley dlya vysokoprochnykh krepezhnykh izdeliy: monografiya* [Rolled products from boron-containing steels for high-strength fasteners: monograph]. Dnepropetrovsk: ART-Press, 2010, 160 p. (In Russ.)
31. Parusov V.V., Sychkov A.B., Zhigarev M.A., Perchatkin A.V. Wire rod of boron bearing low-carbon steel for direct deep drawing. Metallurgist. 2004;48(11-12):626-634.
32. Parusov V.V., Sychkov A.B., Parusov E.V. *Teoreticheskie i tekhnologicheskie osnovy proizvodstva vysokoefektivnykh vidov katanki* [Theoretical and technological framework for the production of highly efficient types of wire rod]. Dnepropetrovsk: ART-Press, 2012, 376 p. (In Russ.)
33. Parusov V.V., Sychkov A.B., Derevyanchenko I.V., Zhigarev M.A. New application of boron in metallur-

References

1. Sychkov A.B., Zhigarev M.A., Perchatkin A.V. *Tekhnologicheskie osobennosti proizvodstva armaturnogo prokata shirokogo naznacheniya* [Technological features of producing reinforcing bars of wide applications]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2006, 499 p. (In Russ.)
2. Sychkov A.B., Sheksheev M.A., Malashkin S.O., Kamalova G.Ya. In-line heat treatment of sectional and shaped steel. *Obrabotka sploshnykh i sloistykh materialov* [Processing of Solid and Layered Materials]. 2016;(2):5-24. (In Russ.)
3. Lis J., Lis A.K., Kolan C. Dual-phase technology and properties of C-Mn steels. *Inżynieria materiałowa*. 2004;3(140):163-165.
4. Xiurong Zuo, Zhengyue Zhou. Study of pipeline steels with acicular ferrite microstructure and ferrite-bainite dual-phase microstructure. *Materials Research*. 2015;18(1):36-41.
5. Historical data on wire, triangular wire fabric/mesh and welded wire concrete reinforcement (WWR). Wire Enforcement Institute (WRI). 2014. 9 p.
6. Xu X.J., Kong J.Q. Study on cooling process of hot

- gy. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2005;(1(9)):15-17. (In Russ.)
18. Sychkov A.B., Parusov V.V., Nesterenko A.M., Zhukova S.Yu., Zhigarev M.A., Perchatkin A.V., Peregodov A.V., Chuiko I.N. *Struktura i svoystva katanki dlya izgotovleniya elektrodov i svarочноy provoloki* [Structure and properties of wire rod for manufacturing electrodes and welding wire]. Bendery: Poligrafist, 2009, 608 p. (In Russ.)
 19. Novikov I., Heinbucker B. Physics. Canada, Toronto/Vancouver: Irvin Publishing, 2001, 706 p.
 20. Popova L.E., Popov A.A. *Diagrammy prevrashcheniya austenita i beta-rastvora v splavakh titana* [Diagrams of the transformation of austenite and beta solution in titanium alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1991, 503 p. (In Russ.)
 21. Popov A.A., Popov A.A. *Spravochnik termista. Izotermicheskie i termokineticheskie diagrammy raspada pereokhlazhdennogo austenita* [Handbook for heat treatment operators. Isothermal and thermokinetic diagrams of the transformation of supercooled austenite]. Moscow, Sverdlovsk: Mashgiz, 1961, 431 p. (In Russ.)

Поступила 04.09.2023; принята к публикации 30.10.2023; опубликована 25.12.2023
Submitted 04/09/2023; revised 30/10/2023; published 25/12/2023

Сычков Александр Борисович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры литейных процессов и материаловедения, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: absychkov@mail.ru. ORCID 0000-0002-0886-1601. Researcher ID: E-4516-2016

Нестеренко Анатолий Михайлович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела физического металловедения, Институт черной металлургии НАН Украины, Днепр, Украина. Email: anatnest1946@gmail.com. ORCID 0000-0001-2345-6789

Завалишин Александр Николаевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры литейных процессов и материаловедения, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: zaval1313@mail.ru. ORCID 0000-0003-0955-8425

Моллер Александр Борисович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии обработки материалов, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: amoller@mail.ru. ORCID 0000-0001-9090-2080

Кулаков Борис Алексеевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры пирометаллургических и литейных технологий, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. Email: kulakovba@susu.ru.

Шубин Игорь Геннадиевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии обработки материалов, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: shubin64@mail.ru.

Aleksandr B. Sychkov – DrSc (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Foundry Processes and Materials Science, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: absychkov@mail.ru. ORCID 0000-0002-0886-1601. Researcher ID: E-4516-2016

Anatoly M. Nesterenko – PhD (Eng.), Senior Researcher of the Department of Physical Metallurgy, Institute of Ferrous Metallurgy of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine. Email: anatnest1946@gmail.com. ORCID 0000-0001-2345-6789

Aleksandr N. Zavalishchin – DrSc (Eng.), Professor, Professor of the Department of Foundry Processes and Materials Science, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: zaval1313@mail.ru. ORCID 0000-0003-0955-8425

Aleksandr B. Moller – DrSc (Eng.), Professor, Head of the Department of Materials Processing Technology, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: amoller@mail.ru. ORCID 0000-0001-9090-2080

Boris A. Kulakov – DrSc (Eng.), Professor, Professor of the Department of Pyrometallurgy and Foundry Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia. Email: kulakovba@susu.ru.

Igor G. Shubin – PhD (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Materials Processing Technology, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: shubin64@mail.ru.

НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES

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

УДК 620.3

DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-4-81-92



ВЛИЯНИЕ МИКРОРАЗМЕРНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА ТЕПЛО- И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫХ ЭЛАСТОМЕРОВ

Щегольков А.В.¹, Щегольков А.В.¹, Земцова Н.В.¹, Комаров Ф.Ф.², Парфимович И.Д.²¹ Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия² НИУ «Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко», Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе представлены исследования функционального материала для электронагрева с эффектом саморегулирования температуры на основе эластомера с нано- и микроразмерными проводящими добавками. Функциональное назначение наномодифицированного эластомера – применение в различных технологических приложениях: микроэлектроника, энергетика и автотранспортная техника. Исследования наномодифицированных эластомеров и синтезированных многослойных углеродных нанотрубок (МУНТ) проведены с помощью сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии, энергодисперсионной спектроскопии, КР-спектроскопии, а также современных методов бесконтактного исследования температурного поля и анализа теплопроводности, температуропроводности и электрофизических параметров. Для модифицирования эластомеров использованы МУНТ, синтезированные с помощью каталитической системы $\text{Fe}_{-0.7}\text{Co}_{/2.1}\text{Al}_2\text{O}_3$. МУНТ представляют массив, который состоит из двух типов наноматериалов: крупных ориентированных УНТ и обвивающих их более мелких УНТ. Крупные нанотрубки характеризуются толщинами с небольшими колебаниями значений в пределах 35-50 нм, равномерной структурой и толщиной стенок, удельной поверхностью $290 \pm 10 \text{ м}^2/\text{г}$. Помимо прочего, внутри самих нанотрубок зарегистрированы одиночные вкрапления частиц катализатора протяженностью от 15 до 30 нм. Теплопроводность эластомеров, модифицированных МУНТ и микроразмерным железом, меняется с $2,88 \cdot 10^{-1}$ до $3,36 \cdot 10^{-1}$ при массовой концентрации железа от 1 до 8%, а температуропроводность меняется с $4,98 \cdot 10^{-7}$ до $6,37 \cdot 10^{-7}$ при той же массовой концентрации. Динамика изменения температурного поля имеет монотонно возрастающий характер с достижением температурного режима с максимальным значением $90,7^\circ\text{C}$. Представленный режим с питающим напряжением 13,5 В является оптимальным для эластомера с добавками Fe с массовой концентрацией 8 мас.% и МУНТ 1 мас.%, так как увеличение питающего напряжения до 15,8 В вызывает нагрев до 159°C , что является предельным значением термической устойчивости для матрицы эластомера. В случае меньшей массовой концентрации МУНТ (1 мас.%) возможны режимы работы с напряжениями до 30,3 В, при которых температура не превысит $74,2^\circ\text{C}$, однако общая мощность при такой концентрации МУНТ для нагревателя будет ниже. Установлено, что для композитов на основе микроразмерного железа и МУНТ характерен режим нагрева до 90°C в течение 114 с от начальной температуры с 25°C , при этом увеличение концентрации МУНТ до 8% приводит к росту температуры на поверхности до 150°C за 7,14 с от температуры 25°C . Структурно микроразмерное железо в эластомере встраивается в виде сферических включений.

Ключевые слова: микроразмерные нанополнители, модификация, железо, углеродные нанотрубки, эластомеры, теплопроводность, электропроводность, тепловое поле

Работа выполнена при поддержке управления образования и науки Тамбовской области в рамках Соглашения №2/МУ2022 о предоставлении гранта по проекту №МУ 2022-02/5 областного конкурса «Гранты для поддержки прикладных научных исследований молодых ученых 2022 года» и финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-53-00032 Бел_а (СЭМ- и ПЭМ-изображения сделаны в Научно-исследовательском учреждении «Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко»).

© Щегольков А.В., Щегольков А.В., Земцова Н.В., Комаров Ф.Ф., Парфимович И.Д., 2023

Для цитирования

Влияние микроразмерных металлических наполнителей на тепло- и электрофизические свойства наномодифицированных эластомеров / Щегольков А.В., Щегольков А.В., Земцова Н.В., Комаров Ф.Ф., Парфимович И.Д. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №4. С. 81-92. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-81-92>



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

INFLUENCE OF MICROSIZED METAL FILLERS ON THERMAL AND ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF NANOMODIFIED ELASTOMERS

Shchegolkov A.V.¹, Shchegolkov A.V.¹, Zemtsova N.V.¹, Komarov F.F.², Parfimovich I.D.²

¹ Tambov State Technical University, Tambov, Russia

² Sevchenko Institute of Applied Physical Problems, Minsk, Belarus

Abstract. This paper presents the research of a functional material based on an elastomer with nano- and microsized conductive additives for electric heating with a self-regulating temperature effect. The functional purpose of nanomodified elastomers is application in various technological applications: microelectronics, power engineering and automotive engineering. Nanomodified elastomers and synthesized multi-wall carbon nanotubes (MWCNT) were studied by scanning and transmission electron microscopy, energy dispersive spectroscopy (EDS), Raman spectroscopy, and modern noncontact methods of analyzing temperature fields, thermal conductivity, thermal diffusivity, and electrophysical parameters. Elastomers were modified using MWCNT synthesized with $\text{Fe}_{-0.7}\text{Co}_{2.1}\text{Al}_2\text{O}_3$ catalytic system. MWCNT are a formation consisting of two types of nanomaterials: large oriented CNT and smaller CNT wrapped around them. Large nanotubes are characterized by thicknesses with small variations in the range of 35-50 nm, a uniform structure and wall thickness, and a specific surface area of $290 \pm 10 \text{ m}^2/\text{g}$. In addition, single embedded catalyst particles ranging from 15 to 30 nm were recorded inside the nanotubes. Thermal conductivity of the elastomers modified with MWCNT and trace amounts of iron changes from $2.88 \cdot 10^{-1}$ to $3.36 \cdot 10^{-1}$ at a mass concentrations of iron from 1 to 8% and thermal conductivity changes from $4.98 \cdot 10^{-7}$ to $6.3 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ at the same mass concentration. Temperature field dynamics shows a monotonic temperature increase, reaching a maximum temperature of 90.7°C . The presented mode with a supply voltage of 13.5 V is optimal for elastomers with Fe additives with a mass concentration of 8 wt.% and MWCNT of 1 wt.% because an increase in supply voltage to 15.8 V causes heating to 159°C , which is the limit value of thermal stability for the elastomer matrix. In case of a lower MWCNT mass concentration (1 wt.%), it is possible to provide operating modes with voltages of up to 30.3 V, when temperature will not exceed 74.2°C , but total power at such concentration of MWCNT for the heater will be lower. It has been established that composites based on microsized iron and MWCNT are characterized by heating up to 90°C for 114 s from an initial temperature of 25°C , while an increase in the concentration of MWCNT up to 8% results in the surface temperature increase to 150°C for 7.14 s from 25°C . Microsized iron in the elastomer is structurally embedded as spherical inclusions.

Keywords: microsized nanofillers, modification, iron, carbon nanotubes, elastomers, thermal conductivity, electrical conductivity, thermal field

The research was funded by the Department of Education and Science of the Tambov Region as part of Grant Agreement No. 2/MY2022 under project No. MY 2022-02/5 of the regional contest "Grants for applied research for young scientists in 2022" and the Russian Foundation for Basic Research as part of research project No. 18-53-00032 Бел_a (SEM and TEM images were obtained at Sevchenko Institute of Applied Physical Problems).

For citation

Shchegolkov A.V., Shchegolkov A.V., Zemtsova N.V., Komarov F.F., Parfimovich I.D. Influence of Microsized Metal Fillers on Thermal and Electrophysical Properties of Nanomodified Elastomers. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 4, pp. 81-92. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-81-92>

Введение

Функциональные материалы на основе полимеров с наноразмерными добавками находят широкое применение в различных технологических приложениях, к которым относятся микроэлектроника, энергетика и автотранспортная техника. Большое разнообразие наноразмерных материалов обуславливает формирование наномодифицированных композитов с широким спектром функциональных свойств, которые реализуются преимущественно за счет формирования электропроводности в структуре полимерной матрицы. Следует выделить такие направления применения наномоди-

фицированных композитов с полимерными матрицами, как тензометрия, антистатические покрытия, радиопоглощающие покрытия и электронагреватели.

Использование многослойных углеродных нанотрубок (МУНТ) в композитах для тензометрии позволяет формировать материалы, обладающие высокими значениями калибровочного коэффициента (GF) 57,894 (0-85,36%), 993,088 (85,36-106,64%) и 5536,346 (106,64-136,32%) и широким диапазоном измерений (0-136,32%) [1].

Использование углеродных нанотрубок (УНТ) в технологиях создания антистатических пленок позволяет реализовать такие свойства, как высокая про-

зрачность, низкое поверхностное сопротивление и устойчивость функционирования во влажной среде и высоких температурах. Поверхностное сопротивление для полиуретана на водной основе (WPU) доходило до значения 423 Ом/кв. при коэффициенте пропускания 82,7% с улучшенной адгезией между УНТ и ПЭТ-пленкой [2].

Многофункциональные материалы для защиты от различного типа электромагнитных помех необходимы для минимизации электромагнитного загрязнения и защиты людей, а также находящихся поблизости устройств или систем. В связи с этим углеродсодержащие материалы считаются перспективными для эффективного экранирования электромагнитных помех и поглотителя микроволн из-за их синергетического механизма потерь, а также настраиваемой архитектуры [3].

Нагреватель, модифицированный УНТ, предназначен для различных применений. Такой нагреватель обладает хорошей растяжимостью при деформации 105% и высоким тепловым откликом, достигающим 206°C при ограниченном приложенном напряжении (2 В) и времени нагрева (~30 с). Результаты исследований [4] показали, что электропроводность нагревателя могла оставаться неизменной (изменение всего на 0,2%) при 100 циклах повторяющейся деформации.

В работе [5] композиционные электротермические пленки с улучшенными характеристиками были получены с помощью подхода послойного осаждения, который включал стадии синтеза путем заливки МУНТ, функционализированных галлатом эпигаллокатехина (Е-МУНТ), в форму из политетрафторэтилена и последующего отверждения раствора поливинилового спирта на поверхности слоя МУНТ. Исследовано поведение электронагрева композитной электротермической пленки различного состава и размера при приложении различных напряжений. Такая пленка обладает улучшенными электротермическими свойствами, то есть быстрой температурной реакцией, которая может достигать установившейся температуры (T_{max}) в течение 90 с. Кроме того, максимальная температура может достигать 140°C при 12 В.

Улучшение электропроводности – не единственное направление, которое может быть реализовано с помощью МУНТ. Следует также рассмотреть направление улучшения теплопроводности. В работе [6] показано, что при массовой концентрации наполнителя 1 мас.% МУНТ композит SiO/МУНТ/EPR обладает высокой теплопроводностью ($0,55 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, что на 196,7% выше, чем у чистого EPR). Применение способа инкапсуляции приводит к улучшению теплопроводности для этих композитов, содержащих гибриды ядро-оболочка SiO/МУНТ. Кроме того, способ инкапсуляции силоксана для МУНТ значительно снижает их электропроводность, что значительно повышает практическую ценность теплопроводных композитов в таком виде.

Высокая эффективность применения наноразмерных добавок в полимерных матрицах может быть реализована в случае полноценного распределения МУНТ в структуре полимерной матрицы.

В работе [7] конфигурация ориентации лиофилизации и новые УНТ, выращенные на месте с помощью ZIF-67, сформировали иерархическую структуру УНТ в композитах на основе эпоксидной смолы (ЭП). Композиты с направленными сетками взаимосвязанных УНТ достигают значения внеплоскостной теплопроводности ($\kappa \perp$) $0,98 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ при содержании наполнителя 5,8 об.%, что в 4,85 раза выше, чем у чистой ЭП.

В настоящее время существует множество способов регулирования распределения УНТ с помощью термодинамических и кинетических факторов [8-10]. Широкое распространение получили биполимерные смеси для управления формирования проводящей сетью посредством селективного распределения УНТ в полимерной фазе или на границах раздела [11]. Например, контролирующее распределение УНТ, расположенных на границе раздела двух полимеров, достигается в композитах PA6/PPO/CNT/CCB за счет контроля формирования транскристаллического слоя PA6, морфологии и селективной локализации нанонаполнителей [12].

Во-вторых, распределение УНТ в полимерной матрице можно регулировать путем модификации поверхности УНТ. Функционализированные имидазолием полиуретановые МУНТ использовались для контроля межфазного распределения и обеспечения совместимости МУНТ, а также для улучшения защиты от электромагнитных помех механических свойств поли(молочной кислоты)/поликапролактона (PLA/PCL)) на основе композитов. Полиуретан способствовал равномерному рассеиванию МУНТ и индуцировал выборочное расположение УНТ на границе раздела и в фазе PCL, что эффективно для построения трехмерной сетевой структуры на совместно-непрерывной границе раздела [13].

В-третьих, распределение УНТ также можно регулировать путем добавления третьих компонентов в полимерную матрицу. Распределение УНТ в смесях PLA/EVA (60/40 wt%) регулируется добавлением оксида графена (GO) (0,1-3 wt%), который имеет тенденцию распределяться на границах раздела PLA и EVA. В результате УНТ перемещаются и захватываются на границах раздела, что значительно улучшает электропроводность композитов [14].

При этом проводящая сеть, включающая отдельные УНТ и некоторые кластеры УНТ (УНТ/кластер УНТ), образованные поли(ε-капролактоном), индуцирующие частичную агрегацию УНТ, строится в заполненных УНТ полимерного композита. Три различных типа полимеров – изотактический полипропилен, полистирол и полимолочная кислота – используются для оценки влияния полимерной матрицы на проводящую сеть [15].

Добавление металлических компонентов улучшает многие характеристики, однако выбор типа металла, морфологии и метода нанесения значительно влияет на результаты [16].

В работе [17] электрические токопроводящие узоры печатались по технологии диспенсерной печати с использованием таких двухфазных дисперсий на

основе полиуретановых и полиакрилатных связующих и различных чешуек металлических микрочастиц. При таком методе нанесения линейное сопротивление находилось в диапазоне от 25 до 100 Ом на 100 см в зависимости от структуры ткани.

Полидиметилсилоксановые (ПДМС) композиты со случайно встроенными МУНТ могут быть дополнены наночастицами железа с углеродным покрытием (FeNP) и графитом [18]. Композит с массовой концентрацией 1 мас.% МУНТ/ПДМС показал электропроводность почти на 4 порядка выше, чем у чистого ПДМС. В работе [18] показано, что формирование проводящих связей в структурах из полимерных композитов является эффективным подходом к созданию высокоэффективных материалов для защиты от электромагнитных помех. Электропроводность выше 10^{-6} См/м для всех композитов МУНТ/ПДМС делает их пригодными для формирования антистатических покрытий [18].

Решение вопросов улучшения распределения МУНТ в полимере должно сопровождаться приданием композиту функциональных свойств. Особенно это важно в случае формирования эффекта положительного температурного коэффициента сопротивления, что позволит получить возможность саморегулирования температуры при электронагреве [19, 20].

Эффект инкапсуляции металлических частиц (никеля) в структуру углеродных нанотрубок исследовался в работе [21]. В работе [22] показано влияние инкапсулированных частиц кобальта в МУНТ на свойства поглощения электромагнитных волн. Инкапсулированные структуры оказывают существенное влияние на свойства углеродных наноматериалов и, в частности, на магнитные свойства, которые изначально не присущи углероду.

Целью работы является улучшение тепло- и электрофизических свойств материалов, предназначенных для электронагрева с эффектом саморегулирования температуры путем использования микроразмерных частиц железа в сочетании с МУНТ.

В соответствии с целью были поставлены следующие задачи:

1) синтезировать МУНТ на основе катализатора $\text{Fe}_{-0,7}\text{Co}_{/2,1}\text{Al}_2\text{O}_3$ и газовой пропан-бутановой смеси и провести модификацию кремнийорганического компаунда (КК) с микроразмерными добавками Fe и МУНТ;

2) исследовать тепло- и электрофизические свойства кремнийорганического компаунда с микроразмерными добавками Fe и МУНТ.

Материалы и методы исследования

Для синтеза МУНТ использована CVD-технология с применением катализатора $\text{Fe}_{-0,7}\text{Co}_{/2,1}\text{Al}_2\text{O}_3$ и газовой пропан-бутановой смеси.

Характеристики катализатора для синтеза МУНТ представлены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики $\text{Fe}_{-0,7}\text{Co}_{/2,1}\text{Al}_2\text{O}_3$ -катализатора

Table 1. Characteristics of $\text{Fe}_{-0,7}\text{Co}_{/2,1}\text{Al}_2\text{O}_3$ catalyst

Катализатор	Удельная поверхность, м ² /г	Эффективность, Г _{угл} /Г _{кат}
$\text{Fe}_{-0,7}\text{Co}_{/2,1}\text{Al}_2\text{O}_3$	70,1	20,6

Использование МУНТ, синтезированных по методу CVD-технологии с применением катализатора $\text{Fe}_{-0,7}\text{Co}_{/2,1}\text{Al}_2\text{O}_3$ и газовой пропан-бутановой смеси, является эффективным подходом, который зарекомендовал себя в работах [23, 24].

Для распределения МУНТ в кремнийорганическом компаунде силагерм 8030 (жидкое состояние) и предотвращения возможного образования агломератов использовался ультразвуковой диспергатор UP 400 St (Hielscher Ultrasonics GmbH, Германия).

Основные стадии получения наномодифицированного композита:

- смешение компонентов кремнийорганического компаунда А и Б (компонент А/компонент Б = 1/1);
- расчёт массовой концентрации МУНТ по отношению к массе кремнийорганического компаунда (А+В) (1):

$$\text{КК} - \text{МУНТ} = \frac{\text{МКК} \cdot \text{СМУНТ}}{100 \text{ мас.\%} - \text{СМУНТ}}, \quad (1)$$

где КК-МУНТ – масса МУНТ и КК, кг; МКК – масса кремнийорганического компаунда (А+В), кг; СМУНТ – массовая концентрация МУНТ;

- расчёт массовой концентрации Fe по отношению к массе кремнийорганического компаунда (А+В) (2):

$$\text{КК} - \text{МУНТ} = \frac{\text{МКК} \cdot \text{Fe}}{100 \text{ мас.\%} - \text{Fe}}; \quad (2)$$

- введение расчетной массовой концентрации МУНТ и Fe в жидкий кремнийорганический компаунд (А+В);

- формование образцов нагревателей с питающими электродами;

- полимеризация кремнийорганического компаунда с МУНТ и Fe при температуре $(80 \pm 5)^\circ\text{C}$ в конвективно-вакуумной сушильной установке (8 часов).

В качестве источника питания использовался лабораторный автотрансформатор (ЛАТР) («Ресанта ЛАТР TDGC2-3», Москва, Россия), с помощью которого возможно изменять питающее напряжение в диапазоне от 0 до 260 В. Для исследования тока и напряжения использовался прибор Fluke 43B (Fluke, Германия).

В работе использовали мультиметры UNI-T UT61E+ и UNI-T UT61D+, подключаемые к ноутбуку HUAWEI MateBook D 15 (256GB) по USB порту.

Для исследования морфологии МУНТ использовали микроскоп Hitachi H-800 (Hitachi, Япония) (СЭМ, ПЭМ).

Для исследования морфологии образцов эластомеров использован метод сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), который реализован в приборе: Thermo Fisher Phenom XL G2 Desktop SEM. Модуль энергодисперсионной спектроскопии – встроенный. Программное обеспечение – Thermo Fisher.

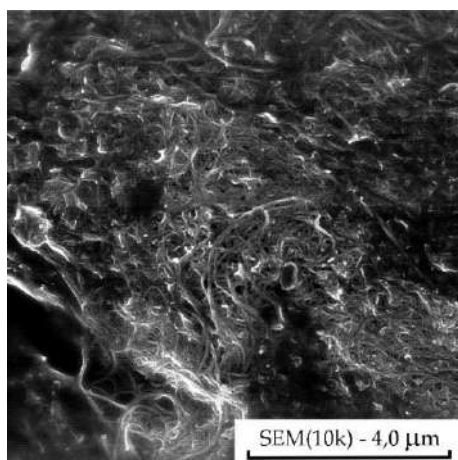
Полученные результаты и их обсуждение

Синтезированные с помощью $\text{Fe}_{-0,7}\text{Co}_{/2,1}\text{Al}_2\text{O}_3$ МУНТ представляют собой массив плотно сбитых нитевидных образований (рис. 1).

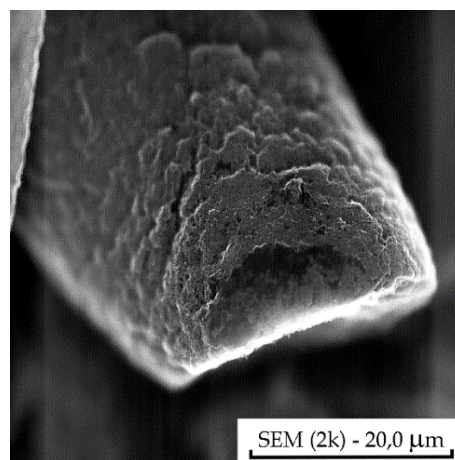
Микрофотографии образцов, полученных с применением просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), позволяют установить, что массив состоит из двух типов наноматериалов: крупных ориентированных УНТ и обвивающих их более мелких УНТ. Круп-

ные нанотрубки характеризуются толщинами с небольшими колебаниями значений в пределах 35-50 нм, равномерной структурой и толщиной стенок, удельной поверхностью $290 \pm 10 \text{ м}^2/\text{г}$. Помимо прочего, внутри самих нанотрубок зарегистрированы одиночные вкрапления частиц катализатора протяженностью от 15 до 30 нм (выделено окружностями на рис. 2). Мелкие нанотрубки характеризуются толщинами порядка 10-12 нм, структура стенок и толщины также равномерны.

Схожий эффект инкапсулирования был достигнут в работе [25], где для синтеза углеродных нанотрубок использовали метод химического осаждения из паровой фазы (CVD) с использованием безводного FeCl_3 в качестве плавающего предшественника катализатора и этилена в качестве источника углерода.



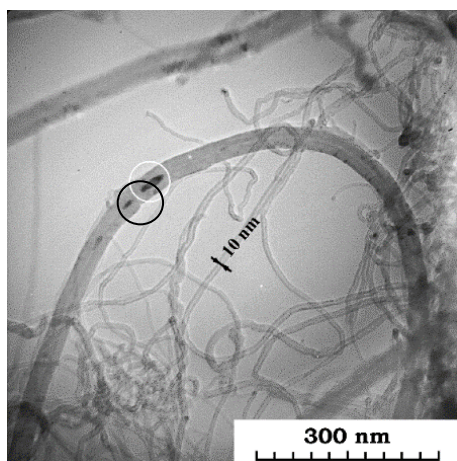
а



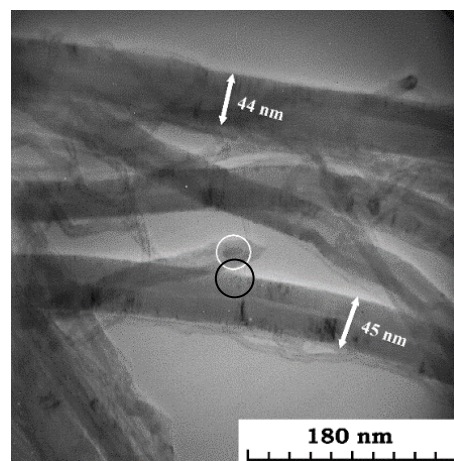
б

Рис. 1. Морфология наноматериала, синтезированного на катализаторе $\text{Fe}_{-0,7}\text{Co}_{/2,1}\text{Al}_2\text{O}_3$: а – увеличение МУНТ 4 мкм; б – увеличение МУНТ 20 мкм

Fig. 1. Morphology of the nanomaterial synthesized on $\text{Fe}_{-0,7}\text{Co}_{/2,1}\text{Al}_2\text{O}_3$ catalyst: а is MWCNT, $\times 4 \mu\text{m}$; б is MWCNT, $\times 20 \mu\text{m}$



а



б

Рис. 2. Структура МУНТ, синтезированного на катализаторе $\text{Fe}_{-0,7}\text{Co}_{/2,1}\text{Al}_2\text{O}_3$: а – увеличение МУНТ 300 нм; б – увеличение МУНТ 180 нм

Fig. 2. Structure of MWCNT synthesized on $\text{Fe}_{-0,7}\text{Co}_{/2,1}\text{Al}_2\text{O}_3$ catalyst: а is MWCNT, $\times 300 \text{ nm}$; б is MWCNT, $\times 180 \text{ nm}$

Рамановский спектр МУНТ, синтезированных на $\text{Fe}_{-0,7}\text{Co}_{/2,1}\text{Al}_2\text{O}_3$ -катализаторе, представлен на **рис. 3**.

Согласно **рис. 3**, степень дефектности графеновых слоев МУНТ (D/G), синтезированных на $\text{Fe}_{-0,7}\text{Co}_{/2,1}\text{Al}_2\text{O}_3$ -катализаторе, составляет 0,74.

В случае применения порошка микроразмерного

железа имеет место структура эластомера с МУНТ, представленная на **рис. 4**.

Элементный состав, полученный методом энергодисперсионной спектроскопии, для железа в структуре эластомера представлен в **табл. 2**.

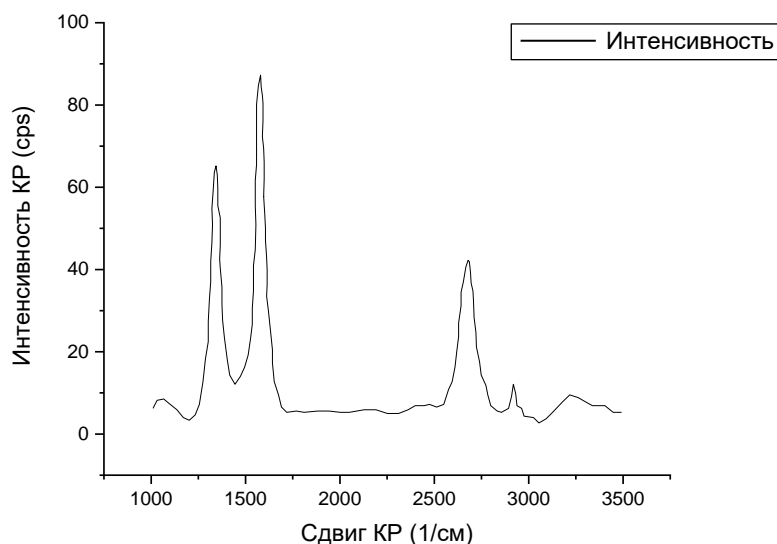
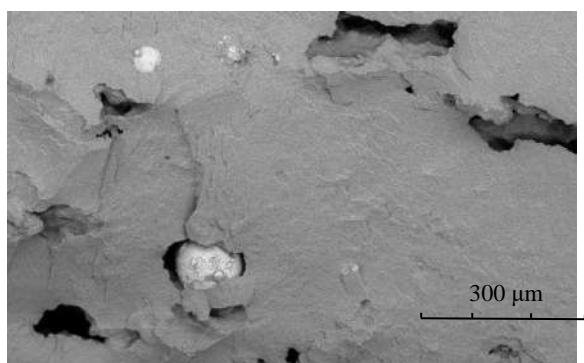
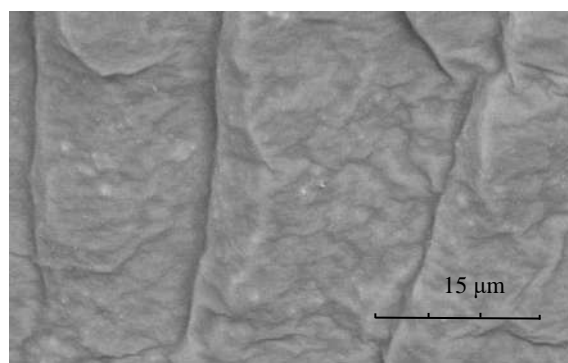


Рис. 3. Рамановский спектр МУНТ, синтезированных на катализаторе $\text{Fe}_{-0,7}\text{Co}_{/2,1}\text{Al}_2\text{O}_3$

Fig. 3. Raman spectra of MWCNT synthesized on $\text{Fe}_{-0,7}\text{Co}_{/2,1}\text{Al}_2\text{O}_3$ catalyst



а



б

Рис. 4. СЭМ-изображения эластомера с железом и МУНТ: а – увеличение поверхности композита 300 мкм;

б – увеличение поверхности композита 15 мкм

Fig. 4. SEM image of the elastomer with iron and MWCNT: а is a composite surface area, $\times 300 \mu\text{m}$;

б is a composite surface area, $\times 15 \mu\text{m}$

Таблица 2. Элементный состав для структуры наномодифицированного эластомера

Table 2. The elemental composition for the nanomodified elastomer structure

Атомный номер элемента	Обозначение	Название	Атомная концентрация	Массовая концентрация
6	C	Carbon	52,542	33,934
8	O	Oxygen	15,241	13,113
13	Al	Aluminum	0,690	1,001
14	Si	Silicon	28,627	43,243
26	Fe	Iron	2,900	8,709

Диаграмма распределения элементов в структуре наномодифицированного эластомера с МУНТ представлена на **рис. 5**.

По данным **рис. 5** в составе композита преобладает Si, так как матрица эластомера кремнийорганическая, а также имеется С и Fe. Наличие Al связано с особенностями $\text{Fe}_{-0,7}\text{Co}_{/2,1}\text{Al}_2\text{O}_3$, содержащего в своем составе Al_2O_3 .

Проведенное исследование теплофизических параметров показывает, как изменяется теплопроводность и температуропроводность при изменении мас-

совой концентрации МУНТ от 1 до 8 мас.% при постоянной массовой концентрации Fe, равной 8 мас.% (**табл. 3**).

При изменении массовой концентрации МУНТ от 1 до 8 мас.% теплопроводность увеличивается с $2,88^{-1}$ до $3,36^{-1} \text{ м} \cdot ^\circ\text{C}$, для температуропроводности значения изменяются от $4,98^{-7}$ до $6,3^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$.

Электропитание образцов нагревателей на основе наномодифицированного эластомера с Fe осуществлялось с помощью ЛАТРа. Режим электропитания по току и напряжению показан на **рис. 6**.

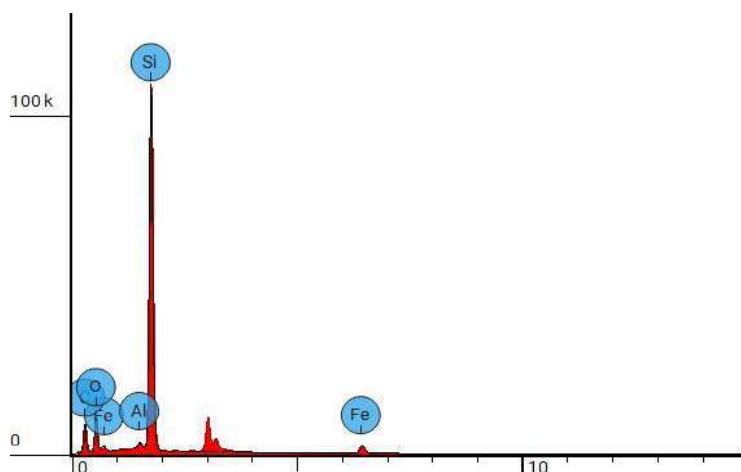


Рис. 5. Диаграмма распределения элементов в структуре эластомера

Fig. 5. Diagram of the element distribution in the elastomer structure

Таблица 3. Измерение теплопроводности λ и температуропроводности a образцов с железом

Table 3. Measurement of thermal conductivity λ and thermal diffusivity a of the samples with iron

(силагерм 8030 +МУНТ 5% +железо 8%)		(силагерм 8030 +МУНТ 1% +железо 8%)	
λ , Вт/(м·°C)	a , [м ² /с]	λ , Вт/(м·°C)	a , [м ² /с]
$3,36^{-1}$	$6,3^{-7}$	$2,88^{-1}$	$4,98^{-7}$

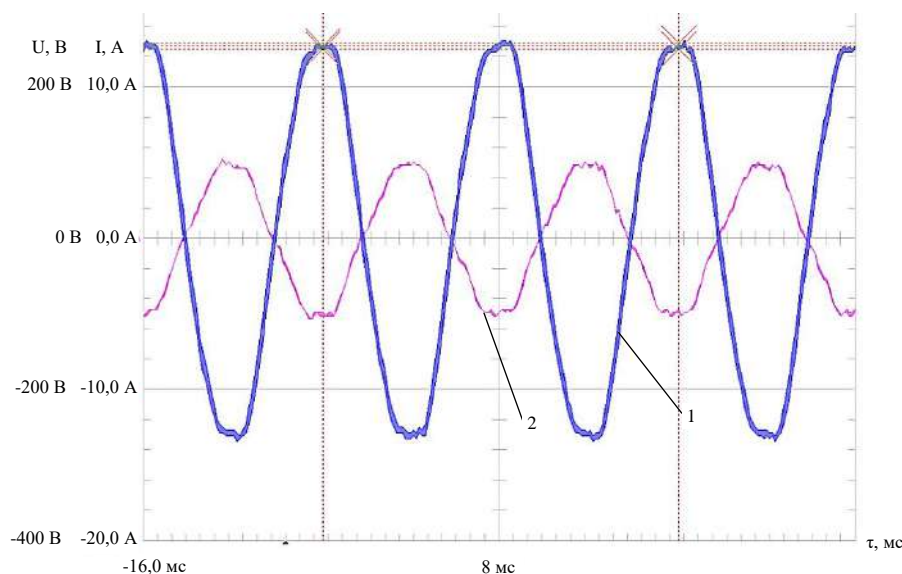


Рис. 6. Режим электропитания по току и напряжению: 1 – напряжение; 2 – ток

Fig. 6. Current and voltage power supply mode: 1 is voltage; 2 is current

На рис. 7 показано исследование температурного поля образца при напряжении 13,5 В.

Проведено четыре замера температурного поля с выдержкой по времени а) 30 с; б) 46 с; в) 113 с; г) 114 с.

Динамика изменения температурного поля показывает монотонное возрастание температуры с достижением температурного режима с максимальной температурой 90,7°C. Представленный режим с питающим напряжением 13,5 В является оптимальным для эластомера с добавками Fe с массовой концентрацией 8 мас.% и МУНТ 1 мас.%, так как увеличение питающего напряжения до 15,8 В вызывает

нагрев до 159°C (табл. 4), что является предельным значением термической устойчивости для матрицы эластомера. В случае меньшей массовой концентрации МУНТ (1 мас.%) возможны режимы работы с напряжениями до 30,3 В, при которых температура не превысит 74,2°C, однако общая мощность при такой массовой концентрации МУНТ для нагревателя будет ниже.

Режимы работы образца силагера 8030 (железо 8 мас.%, МУНТ 1 мас.%) приведены в табл. 4.

Режимы работы образца силагера 8030 (железо 8 мас.%, МУНТ 5 мас.%) приведены в табл. 5.

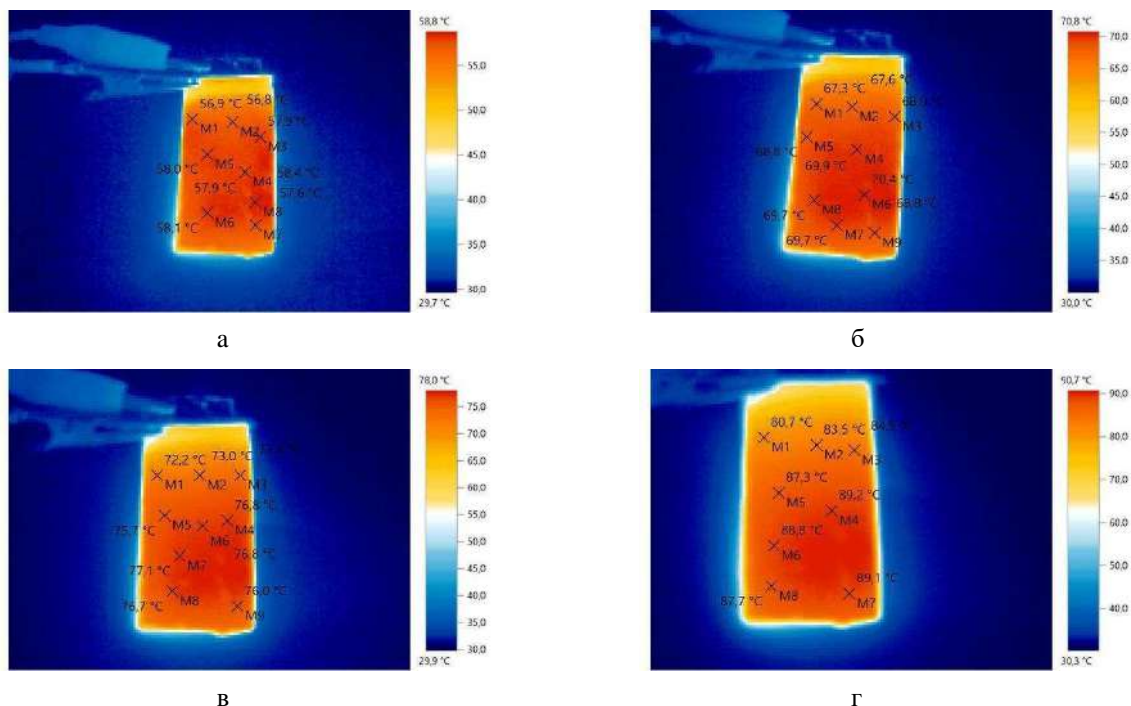


Рис. 7. Термограмма нагревателя с железом 8%, МУНТ 5%: а – 30 с; б – 46 с; в – 113 с; г – 114 с
Fig. 7. Thermogram of the heater with 8% iron, 5% MWCNT: а is 30 s; б is 46 s; в is 113 s; г is 114 s

Таблица 4. Режимы работы образца силагера 8030 (железо 8 мас.%, МУНТ 1 мас.%)

Table 4. Operating modes of the silagerm 8030 sample (iron is 8 wt.%, MWCNT is 1 wt.%)

Напряжение, В	Сила тока, мкА	Температура, °C	Время, с
2,5	0,01	30,0	2
5,4	0,133	31,7	32
10,4	2,47	31,0	0,87
15,5	14,36	36,7	2,16
20,6	29,85	50,0	2,99
25,2	41,15	61,5	2,04
30,3	47,50	74,2	1,92

Таблица 5. Режимы работы образца силагера 8030 (железо 8 мас.%, МУНТ 5 мас.%)

Table 5. Operating modes of the silagerm 8030 sample (iron is 8 wt.%, MWCNT is 5 wt.%)

Напряжение, В	Сила тока, мкА	Температура, °C	Время, с
2,4	0,102	30,1	2
5,4	20,74	34,7	1,34
10,3	64,37	61,4	2,74
15,8	124,3	159,0	1,06

Заключение

Синтезированные с помощью $\text{Fe}_{0,7}\text{Co}_{2,1}\text{Al}_2\text{O}$ МУНТ представляют собой нитевидные образования диаметром ~ 30 нм и удельной поверхностью $280,6 \text{ м}^2/\text{г}$. Теплопроводность меняется с $2,88^{-1}$ до $3,36 \cdot 10^{-1} \text{ м}^{\circ}\text{C}$, а температуропроводность меняется с $4,98^{-7}$ до $6,3^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$.

Установлено, что для композитов на основе железа и МУНТ характерен режим нагрева до 90°C в течение 10 мин от начальной температуры с 25°C , при этом увеличение концентрации МУНТ до 8% приводит к росту температуры на поверхности до 150°C за 4,2 мин с 25°C . Структурно железо в эластомере встраивается в виде сферических включений. Динамика изменения температурного поля показывает монотонное возрастание температуры с достижением температурного режима с максимальным значением $90,7^{\circ}\text{C}$. Представленный режим с питающим напряжением 13,5 В является оптимальным для эластомера с добавками Fe с массовой концентрацией 8 мас.%, МУНТ 1 мас.%, так как увеличение питающего напряжения до 15,8 В вызывает нагрев до 159°C , что является предельным значением термической устойчивости для матрицы эластомера. В случае меньшей массовой концентрации МУНТ (1 мас.%) возможны режимы работы с напряжениями до 30,3 В, при которых температура не превысит $74,2^{\circ}\text{C}$, однако общая мощность при такой концентрации МУНТ для нагревателя будет ниже.

Список источников

1. Yu T., Lü X., Bao W. High electrical self-healing flexible strain sensor based on MWCNT-polydimethylsiloxane elastomer with high gauge factor and wide measurement range // *Composites Science and Technology*. 2023, vol. 238, 110049. DOI: 10.1016/j.compscitech.2023.110049
2. Carbon nanotube/polyurethane films with high transparency, low sheet resistance and strong adhesion for anti-static application / Tian Y., Zhang X., Geng H.-Z., Yang H.-J., Li C., Da S.-X., Lu X., Wang J., Jia S.-L. // *RSC Advances*. 2017, vol. 83, no. 7, pp. 53018-53024. DOI: 10.1039/C7RA10092B
3. Recent advancements in carbonaceous nanomaterials for multifunctional broadband electromagnetic interference shielding and wearable devices / Kuila C., Maji A., Murmu N.C., Kuila T., Srivastava S.K. // *Carbon*. 2023, vol. 210, 118075. DOI: 10.1016/j.carbon.2023.118075
4. Modified carbon anotubes/polyvinyl alcohol composite electrothermal films / Liu X.-L., Li M., Geng W.-H., Cao W., Tian Y.-H., Li T.-Y., Bin P.-S., Qian P.-F., Geng H.-Z. // *Surfaces and Interfaces*. 2023, vol. 36, 102540. DOI: 10.1016/j.surfin.2022.102540
5. Highly stretchable, fast thermal response carbon nanotube composite heater / Xu F., Aouraghe M.A., Xie X., Zheng L., Zhang K., Fu K.K. // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2021, vol. 147, 106471. DOI: 10.1016/j.compositesa.2021.106471
6. Fabrication of high-performance thermally conductive and electrically insulating polymer composites with siloxane/multi-walled carbon nanotube core-shell hybrids at low filler content / Wang Z.-Y., Sun X., Wang Y., Liu J.-D., Zhang C., Zhao Z.-B., Du X.-Y. // *Polymer*. 2022, vol. 262, 125430. DOI: 10.1016/j.polymer.2022.125430
7. Covalently interconnected carbon nanotubes network enhancing thermal conductivity of EP-based composite / Li X., Wu B., Chen P., Xia R., Qian J. // *Composites Communications*. 2023, vol. 40, 101591. DOI: 10.1016/j.coco.2023.101591
8. Jin L., Zhou C.B. Alignment of carbon nanotubes in a polymer matrix by mechanical stretching // *Applied Physics Letters*. 1998, vol. 73, 1197-1199.
9. Dispersion of Single-Walled Carbon Nanotubes in Aqueous Solutions of the Anionic Surfactant NaDDBS / Matarredona O., Rhoads H. et al. // *Journal of Physical Chemistry B*. 2003, vol. 107, no. 48, pp. 13357-13367.
10. The role of surfactants in dispersion of carbon nanotubes / Vaisman L., Wagner H.D. et al. // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2006, vol. 128, pp. 37-46.
11. Control of carbon nanotubes at the interface of a co-continuous immiscible polymer blend to fabricate conductive composites with ultralow percolation thresholds / Huang J., Mao C., Zhu Y., Jiang W., Yang X. // *Carbon*. 2014, vol. 73, pp. 267-274. DOI: 10.1016/j.carbon.2014.02.063
12. Enhancing the electrical conductivity of PA6/PPO/CNT/CCB nanocomposites via control of PA6 transcrystalline layer formation, morphology, and selective localization of nanofillers / Farhadpour M., Pircheraghi G., Marouf B.T., Bagheri R. // *Polymer Testing*. 2023, vol. 121, 107978. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2023.107978
13. Interfacial distribution and compatibilization of imidazolium functionalized CNTs in poly(lactic acid)/polycaprolactone composites with excellent EMI shielding and mechanical properties / Huang B., Wang Z., Tu J., Liu C., Xu P., Ding Y. // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2023, vol. 227, pp. 1182-1190. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2022.11.304
14. Selective localization of reduced graphene oxides at the interface of PLA/EVA blend and its resultant electrical resistivity / Shen Y., Zhang T.-T., Yang J.-H., Zhang N., Huang T., Wang Y. // *Polymer Composites*. 2015, vol. 38, no. 9. DOI: 10.1002/pc.23769
15. Construction of unique conductive networks in carbon nanotubes/polymer composites via poly(ϵ -caprolactone) inducing partial aggregation of carbon nanotubes for microwave shielding enhancement / Tao J.-R., Luo C.-L., Huang M.-L., Weng Y.-X., Wang M. // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2023, vol. 164, 107304. DOI: 10.1016/j.compositesa.2022.107304
16. Evaluation of the morphology of metal particles in intrinsic conductive polymer dispersions / Lempa E.,

- Graßmann C., Rabe M., Schwarz-Pfeiffer A., van Langenhove L. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017, vol. 254, no. 2, 022006. DOI: 10.1088/1757-899X/254/2/022006
17. Lempa E., Rabe M., van Langenhove L. Dispenser printing with electrically conductive microparticles. Solid State Phenomena. Trans Tech Publications, Ltd. 2022, vol. 333, pp. 31-38. DOI: 10.4028/p-zs1155
 18. Electrical conductivity and electromagnetic interference shielding effectiveness of elastomer composites: Comparative study with various filler systems / Shetty H.D., Ashok Reddy G.V., Ramasamy V., Kaliprasad C.S., Daruka Prasad B., Yogananda H.S., Naik R., Prasad V., Koyyada G., Kumar Y.A. // Inorganic Chemistry Communications. 2023, vol. 151, 110578. DOI: 10.1016/j.inoche.2023.110578
 19. Shchegolkov A.V., Shchegolkov A.V., Zemtsova N.V. Investigation of heat release in nanomodified elastomers during stretching and torsion under the action of electric voltage // Frontier Materials & Technologies. 2022, no. 2, pp. 121-132.
 20. Shchegolkov A.V., Shchegolkov A.V. *Antibledenitel'nye sistemy na osnove elastomeroi, modifitsirovannykh ugleirodnyimi nanostrukturami, s efektom samoregulirovaniya temperatury* [Anti-icing systems based on elastomers modified with carbon nanostructures with self-regulating temperature effect]. Natural Resources of the Arctic and Subarctic. 2022, vol. 27, no. 1, pp. 141-151. (In Russ.)
 21. Magnetic properties and transmission electron microscopy studies of Ni nanoparticles encapsulated in carbon nanocages and carbon nanotubes / He C., Zhao N., Shi C., Li J., Li H. // Materials Research Bulletin. 2008, vol. 43, no. 8-9, pp. 2260-2265. DOI: 10.1016/j.materresbull.2007.08.015
 22. Lightweight porous cobalt-encapsulated Nitrogen-Doped Carbon nanotubes for tunable, efficient and stable electromagnetic waves absorption / Jiang B., Yang W., Wang C., Bai H., Ma G., Li Z., Zhang C., Li S., Chen N., Ta N., Wang X., Li Y. // Carbon. 2023, vol. 202, no. 1, pp. 173-186. DOI: 10.1016/j.carbon.2022.10.032
 23. Синтез и исследование катодных материалов на основе углеродных нанотрубок для литий-ионных аккумуляторов / Щегольков А.В., Комаров Ф.Ф., Липкин М.С., Мильчанин О.В., Парфимович И.Д., Щегольков А.В., Семенова А.В., Величко А.В., Чеботов К.Д., Нохаева В.А. // Перспективные материалы. 2021. Т. 2. С. 66-76. DOI: 10.30791/1028-978X-2021-2-66-76
 24. Щегольков А.В. Сравнительный анализ тепловых эффектов в эластомерах, модифицированных МУНТ при постоянном электрическом напряжении // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2021. №1(55). С. 63-73. DOI: 10.18323/2073-5073-2021-1-63-73
 25. Zhu W., Zhao Z., Qiu J. In situ synthesis of Fe-filled carbon nanotubes by a floating CVD method with FeCl₃ as catalyst precursor // Carbon. 2009, vol. 47, no. 12, pp. 2943-0. DOI: 10.1016/j.carbon.2009.06.014

References

1. Yu T., Lü X., Bao W. High electrical self-healing flexible strain sensor based on MWCNT-polydimethylsiloxane elastomer with high gauge factor and wide measurement range. Composites Science and Technology. 2023;238:110049. DOI: 10.1016/j.compscitech.2023.110049
2. Tian Y., Zhang X., Geng H.-Z., Yang H.-J., Li C., Da S.-X., Lu X., Wang J., Jia S.-L. Carbon nanotube/polyurethane films with high transparency, low sheet resistance and strong adhesion for antistatic application. RSC Advances. 2017;7(83):53018-53024. DOI: 10.1039/C7RA10092B
3. Kuila C., Maji A., Murmu N.C., Kuila T., Srivastava S.K. Recent advancements in carbonaceous nanomaterials for multifunctional broadband electromagnetic interference shielding and wearable devices. Carbon. 2023;210:118075. DOI: 10.1016/j.carbon.2023.118075
4. Liu X.-L., Li M., Geng W.-H., Cao W., Tian Y.-H., Li T.-Y., Bin P.-S., Qian P.-F., Geng H.-Z. Modified carbon nanotubes/polyvinyl alcohol composite electrothermal films. Surfaces and Interfaces. 2023;36:102540. DOI: 10.1016/j.surfin.2022.102540
5. Xu F., Aouraghe M.A., Xie X., Zheng L., Zhang K., Fu K.K. Highly stretchable, fast thermal response carbon nanotube composite heater. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2021;147:106471. DOI: 10.1016/j.compositesa.2021.106471
6. Wang Z.-Y., Sun X., Wang Y., Liu J.-D., Zhang C., Zhao Z.-B., Du X.-Y. Fabrication of high-performance thermally conductive and electrically insulating polymer composites with siloxane/multi-walled carbon nanotube core-shell hybrids at low filler content. Polymer. 2022;262:125430. DOI: 10.1016/j.polymer.2022.125430
7. Li X., Wu B., Chen P., Xia R., Qian J. Covalently interconnected carbon nanotubes network enhancing thermal conductivity of EP-based composite. Composites Communications. 2023;40:101591. DOI: 10.1016/j.coco.2023.101591
8. Jin L., Zhou C.B. Alignment of carbon nanotubes in a polymer matrix by mechanical stretching. Applied Physics Letters. 1998;73:1197-1199.
9. Matarredona O., Rhoads H. et al. Dispersion of single-walled carbon nanotubes in aqueous solutions of the anionic surfactant NaDDBS. Journal of Physical Chemistry B. 2003;107(48):13357-13367.
10. Vaisman L., Wagner H.D. et al. The role of surfactants in dispersion of carbon nanotubes. Advances in Colloid and Interface Science. 2006;128:37-46.
11. Huang J., Mao C., Zhu Y., Jiang W., Yang X. Control of carbon nanotubes at the interface of a co-continuous immiscible polymer blend to fabricate conductive composites with ultralow percolation

- thresholds. Carbon. 2014;73:267-274. DOI: 10.1016/j.carbon.2014.02.063
12. Farhadpour M., Pircheraghi G., Marouf B.T., Bagheri R. Enhancing the electrical conductivity of PA6/PPO/CNT/CCB nanocomposites via control of PA6 transcrystalline layer formation, morphology, and selective localization of nanofillers. Polymer Testing. 2023;121:107978. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2023.107978
 13. Huang B., Wang Z., Tu J., Liu C., Xu P., Ding Y. Interfacial distribution and compatibilization of imidazolium functionalized CNTs in poly(lactic acid)/polycaprolactone composites with excellent EMI shielding and mechanical properties. International Journal of Biological Macromolecules. 2023;227:1182-1190. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2022.11.304
 14. Shen Y., Zhang T.-T., Yang J.-H., Zhang N., Huang T., Wang Y. Selective localization of reduced graphene oxides at the interface of PLA/EVA blend and its resultant electrical resistivity. Polymer Composites. 2015;38(9). DOI: 10.1002/pc.23769
 15. Tao J.-R., Luo C.-L., Huang M.-L., Weng Y.-X., Wang M. Construction of unique conductive networks in carbon nanotubes/polymer composites via poly(ϵ -caprolactone) inducing partial aggregation of carbon nanotubes for microwave shielding enhancement. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2023;164:107304. DOI: 10.1016/j.compositesa.2022.107304
 16. Lempa E., Graßmann C., Rabe M., Schwarz-Pfeiffer A., van Langenhove L. Evaluation of the morphology of metal particles in intrinsic conductive polymer dispersions. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017;254(2), 022006. DOI: 10.1088/1757-899X/254/2/022006
 17. Lempa E., Rabe M., van Langenhove L. Dispenser printing with electrically conductive microparticles. Solid State Phenomena. Trans Tech Publications, Ltd. 2022;333:31-38. DOI: 10.4028/p-zs1155
 18. Shetty H.D., Ashok Reddy G.V., Ramasamy V., Kaliprasad C.S., Daruka Prasad B., Yogananda H.S., Naik R., Prasad V., Koyyada G., Kumar Y.A. Electrical conductivity and electromagnetic interference shielding effectiveness of elastomer composites: Comparative study with various filler systems. Inorganic Chemistry Communications. 2023;151:110578. DOI: 10.1016/j.inoche.2023.110578
 19. Shchegolkov A.V., Shchegolkov A.V., Zemtsova N.V. Investigation of heat release in nanomodified elastomers during stretching and torsion under the action of electric voltage. Frontier Materials & Technologies. 2022;(2):121-132.
 20. Shchegolkov A.V., Shchegolkov A.V. Anti-icing systems based on elastomers modified with carbon nanostructures with self-regulating temperature effect. *Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki* [Arctic and Subarctic Natural Resources]. 2022;27(1):141-151. (In Russ.)
 21. He C., Zhao N., Shi C., Li J., Li H. Magnetic properties and transmission electron microscopy studies of Ni nanoparticles encapsulated in carbon nanocages and carbon nanotubes. Materials Research Bulletin. 2008;43(8-9):2260-2265. DOI: 10.1016/j.materresbull.2007.08.015
 22. Jiang B., Yang W., Wang C., Bai H., Ma G., Li Z., Zhang C., Li S., Chen N., Ta N., Wang X., Li Y. Lightweight porous cobalt-encapsulated nitrogen-doped carbon nanotubes for tunable, efficient and stable electromagnetic waves absorption. Carbon. 2023;202(1):173-186. DOI: 10.1016/j.carbon.2022.10.032
 23. Shchegolkov A.V., Komarov F.F., Lipkin M.S., Milchanin O.V., Parfimovich I.D., Shchegolkov A.V., Semenkova A.V., Velichko A.V., Chebotov K.D., Nokhaeva V.A. Synthesis and study of cathode materials based on carbon nanotubes for lithium-ion batteries. *Perspektivnye materialy* [Promising Materials]. 2021;2:66-76. (In Russ.) DOI: 10.30791/1028-978X-2021-2-66-76
 24. Shchegolkov A.V. The comparative analysis of thermal effects in elastomers modified with MWCNT at DC voltage. *Vektor nauki Tolyatinskogo gosudarstvennogo universiteta* [Science Vector of Togliatti State University]. 2021;(1(55)):63-73. (In Russ.) DOI: 10.18323/2073-5073-2021-1-63-73
 25. Zhu W., Zhao Z., Qiu J. In situ synthesis of Fe-filled carbon nanotubes by a floating CVD method with FeCl₃ as catalyst precursor. Carbon. 2009;47(12):2943-0. DOI: 10.1016/j.carbon.2009.06.014

Поступила 04.07.2023; принята к публикации 19.09.2023; опубликована 25.12.2023
Submitted 04/07/2023; revised 19/09/2023; published 25/12/2023

Щегольков Александр Викторович – кандидат технических наук, доцент,
Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия.
Email: energynano@yandex.ru. ORCID 0000-0002-4317-0689

Щегольков Алексей Викторович – кандидат технических наук, инженер,
Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия.
Email: alexxx5000@mail.ru. ORCID 0000-0002-1838-3842

Земцова Наталия Викторовна – аспирант,
Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия.
Email: natasha_paramonova68@mail.ru. ORCID 0000-0002-5274-6133

Комаров Фадей Фадеевич – заведующий лабораторией, доктор физико-математических наук,
профессор, академик НАНБ, Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных
физических проблем им. А.Н. Севченко», Минск, Республика Беларусь.
Email: komarovF@bsu.by. ORCID 0000-0001-8292-8942

Парфимович Иван Дмитриевич – младший научный сотрудник, Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко», Минск, Республика Беларусь. Email: parfimovich@bsu.by. ORCID 0000-0002-5922-6333

Aleksandr V. Shchegolkov – PhD (Eng.), Associate Professor, Tambov State Technical University, Tambov, Russia. Email: energynano@yandex.ru. ORCID 0000-0002-4317-0689

Aleksey V. Shchegolkov – PhD (Eng.), engineer, Tambov State Technical University, Tambov, Russia. Email: alexxx5000@mail.ru. ORCID 0000-0002-1838-3842

Natalia V. Zemtsova – postgraduate student, Tambov State Technical University, Tambov, Russia. Email: natasha_paramonova68@mail.ru. ORCID 0000-0002-5274-6133

Fadey F. Komarov – Head of the Laboratory, DrSc (Physics and Mathematics), Professor, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Sevchenko Institute of Applied Physical Problems, Minsk, the Republic of Belarus. Email: komarovF@bsu.by. ORCID 0000-0001-8292-8942

Ivan D. Parfimovich – Junior Researcher, Sevchenko Institute of Applied Physical Problems, Minsk, the Republic of Belarus. Email: parfimovich@bsu.by. ORCID 0000-0002-5922-6333

СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ STANDARDIZATION, CERTIFICATION AND QUALITY MANAGEMENT

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.793.5:620.191
DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-4-93-104



ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ И НАТЯЖЕНИЯ СТАЛЬНОЙ ПОЛОСЫ НА ДЕФЕКТЫ ПРОДУКЦИИ АГРЕГАТОВ НЕПРЕРЫВНОГО ГОРЯЧЕГО ОЦИНКОВАНИЯ

Рябчиков М.Ю., Рябчикова Е.С., Чута А.С., Васильева Е.И., Емелюшин А.Н.

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

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Достижения последних лет в области управления термической обработкой стальной полосы на агрегатах непрерывного горячего оцинкования позволяют оптимизировать скорость линии под текущие производственные условия. Однако ошибки управления натяжением полосы при частых изменениях скоростного режима могут приводить к дефектам покрытия. **Цель работы.** Работа посвящена определению дефектов оцинкованного листового проката, появление которых может ограничить производительность агрегатов непрерывного горячего оцинкования вследствие проблем управления натяжением стальной полосы, и поиску причин возникновения таких дефектов. **Используемые методы.** Выполнен анализ данных о дефектах продукции одного из агрегатов непрерывного горячего оцинкования завода «ММК Metallurgy» в Турции. Для исключения влияния мешающих факторов при определении сопутствующих обстоятельств возникновения дефекта использовали стратификацию по мешающим параметрам, к которым отнесли вид дефекта, марку стали и толщину полосы. Для оценки воздействия факторов на частоту возникновения дефектов использовали тест Мантеля-Ханзела. **Новизна.** Анализ больших данных о дефектной и недефектной продукции за период порядка двух лет позволил применить стратификацию по многим мешающим факторам и выявить причины возникновения некоторых из дефектов. **Результат.** Определены допустимые и недопустимые дефекты, вероятность появления которых увеличивается с ростом скорости линии или уровнем её изменения. Показано влияние натяжения на вероятность возникновения этих дефектов и рассмотрены перспективы дальнейшего совершенствования систем управления натяжением стальной полосы. **Практическая значимость.** Полученные результаты являются основой дальнейшего совершенствования систем поддержки управления производством оцинкованного листового проката путем учета качества продукции.

Ключевые слова: непрерывное горячее оцинкование, стальная полоса, дефекты, натяжение, скорость движения полосы, производительность

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-10058, <https://rscf.ru/project/23-29-10058/>.

© Рябчиков М.Ю., Рябчикова Е.С., Чута А.С., Васильева Е.И., Емелюшин А.Н., 2023

Для цитирования

Влияние скорости движения и натяжения стальной полосы на дефекты продукции агрегатов непрерывного горячего оцинкования / Рябчиков М.Ю., Рябчикова Е.С., Чута А.С., Васильева Е.И., Емелюшин А.Н. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №4. С. 93-104. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-93-104>



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

INFLUENCE OF STEEL STRIP SPEED AND TENSION ON PRODUCT DEFECTS ON CONTINUOUS HOT-DIP GALVANIZING LINES

Ryabchikov M.Yu., Ryabchikova E.S., Chuta A.S., Vasilyeva E.I., Emelyushin A.N.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). Recent advances in steel strip heat treatment control on continuous hot-dip galvanizing lines contribute to optimizing line speed for current production conditions. However, errors in strip tension control with frequent changes in speed conditions can lead to coating defects. **Objectives.** The paper is devoted to identifying defects in galvanized sheet products, which can limit the productivity of continuous hot-dip galvanizing lines due to problems in controlling steel strip tension, and searching for the causes of such defects. **Methods Applied.** The authors analyzed the data on defects in the products of one of the continuous hot-dip galvanizing lines of MMK Metalurji in Turkey. To exclude the influence of interfering factors, when determining the accompanying circumstances of occurrence of a defect, the stratification was used according to interfering parameters. Such parameters included a defect type, steel grade and strip thickness. The Cochran-Mantel-Haenszel test was used to assess the impact of factors on the defects frequency. **Originality.** By analyzing big data on defective and non-defective products over around two years, the authors applied the stratification according to many interfering factors and identified the causes of some defects. **Result.** The authors determined acceptable and unacceptable defects, whose probability increases with increasing line speed or the level of its change. The paper shows the influence of tension on the probability of occurrence of these defects and considers the prospects for further improvement of steel strip tension control systems. **Practical Relevance.** The results obtained are the basis for further improvement of support systems for production control of galvanized sheet products by factoring into the product quality.

Keywords: continuous hot-dip galvanizing, steel strip, defects, tension, strip speed, performance

The study was funded by grant No. 23-29-10058 of the Russian Science Foundation, <https://rscf.ru/project/23-29-10058/>.

For citation

Ryabchikov M.Yu., Ryabchikova E.S., Chuta A.S., Vasilyeva E.I., Emelyushin A.N. Influence of Steel Strip Speed and Tension on Product Defects on Continuous Hot-Dip Galvanizing Lines. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 4, pp. 93-104. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-93-104>

Введение

Оцинкованная стальная полоса – один из основных видов продукции металлургических предприятий с высокой добавочной стоимостью, который, например, широко используется в автомобильной и строительной промышленности [1, 2]. Спрос на данный вид продукции в течение последних десятилетий увеличивался. Так, в развитых странах доля оцинкованного проката в структуре потребления металлопродукции достигает 15% и более.

Повышение эффективности работы агрегатов непрерывного горячего оцинкования (АНГЦ) является важной задачей. До настоящего времени значительные усилия исследователей в данной области были сосредоточены на решении задач энергосбережения и повышения качества продукции. Известно значительное число недопустимых и допустимых дефектов оцинкованного листового проката, которые в той или иной степени снижают его коррозионную стойкость. При этом существует относительно мало работ в области оптимизации скорости движения полосы, несмотря на то, что увеличение производительности уже введенных в строй агрегатов непрерывного горячего оцинко-

вания при минимальных сопутствующих затратах является чрезвычайно актуальной задачей. Причиной этого является значительное число факторов, связанных как с мощностью систем нагрева и охлаждения металла при его термической обработке, так и с повышением вероятности получения дефектов продукции. Сложности учета всех технологических ограничений приводят к существенной роли человеческого фактора, что, в свою очередь часто приводит к неэффективности операций в плане производительности.

В то же время за последние годы были предложены новые решения в области управления термической обработкой [3, 4]. Это дает возможность повышения производительности при выполнении требований к термической обработке, но связь скорости движения полосы с дефектами по-прежнему изучена относительно слабо. Одной из причин этого является то, что влияние скорости движения полосы на возникновение некоторых дефектов связано с другими факторами. Если, например, параметры полосы и скорость ее движения оказывают совместное влияние на возникновение дефекта, то выявить влияние скорости может быть затруднительно.

Управление натяжением стальной полосы в различных секциях агрегата производится с учетом скорости движения полосы, ее толщины и ширины. Ошибки управления натяжением могут приводить к различным дефектам полосы. Вследствие этого представляет интерес оценка готовности существующих систем управления натяжением к повышению скорости движения полос толщиной более 1 мм. Для таких полос используемые в настоящее время скорости существенно ниже предельной для агрегата скорости.

Влияние натяжения на дефекты

В работе [5] указано, что тепловая нагрузка в секции нагрева АНГЦ существенно возрастает с ростом скорости движения полосы. Это увеличивает тепловую выпуклость валков, что может привести к смещению полосы. Стальная полоса, которая находится в печи, имеет пониженный предел текучести. Это может привести к тепловым короблениям вследствие изгибов из-за неравномерного распределения тепла. Основной причиной коробления полосы в печи является комбинированное воздействие высокой температуры и натяжения. Согласно [6], при определенном распределении температуры по длине полосы превышение натяжением первого критического значения приводит к короблению. При дальнейшем увеличении натяжения и превышении второго критического значения коробление может уменьшиться, если деформация еще не получила развития. С ростом ширины полосы вероятность коробления возрастает, но повышение равномерности распределения температуры по ширине полосы позволяет избежать коробления только в низкотемпературном диапазоне.

Авторы [7] указывают, что для отсутствия царапин, притиров и вмятин необходимо точно поддерживать заданную скорость и крутящий момент. Причины колебаний натяжения могут быть различны. Согласно [7], требуется эффективная отработка возмущений от входного накопителя и предотвращения их попадания в печь путем управления изменением момента в натяжном узле и снижения пульсаций скорости. В [8] указывается, что из-за нагрева полоса в печи удлиняется. При этом также снижается твердость и увеличивается пластичность, а также вязкость стали. Это приводит к колебаниям полосы в промежутках между роликами в секциях нагрева и выдержки. В работе [9] указывается, что секция закрытого охлаждения отличается значительной протяженностью. Вследствие этого потоки охлаждающего газа могут приводить к колебаниям полосы при недостаточном ее натяжении. Учитывая, что при дрессировке полоса подвергается механическому воздействию, натяжение полосы на этом участке также может влиять на возникновение дефектов.

В [10] отмечается, что возмущения, возникающие в ванне и в секции закрытого охлаждения, а также

направляющие ролики в ванне влияют на смещение полосы в области газовых ножей. Даже при использовании систем электромагнитной стабилизации полосы перед газовыми ножами следует учитывать, что, согласно [11], толщина полосы и параметры стали оказывают значительное влияние на управление стабилизацией. Вследствие этого натяжение полосы на участке газовых ножей может оказывать влияние на возникновение дефектов. Согласно [12], вибрации полосы вблизи газового ножа могут привести к нарушению заданной толщины цинкового покрытия. Авторы указывают, что причинами вибраций являются движения роликов в расплаве, а также несовершенство систем управления натяжением полосы. В работе [13] авторы отмечают, что подавить вибрацию полосы в окрестностях газовых ножей оказывается существенно сложнее с ростом скорости движения полосы. При этом скорость оказывает существенное влияние на амплитуду колебаний полосы. Большее натяжение позволяет ограничить максимальную амплитуду колебаний. Авторы [13] также отмечают, что при исследовании вибраций влиянием расплавленного цинка можно пренебречь. Увеличение жесткости опор контактных валков также способствует уменьшению амплитуды вибраций.

В работе [14] исследуется влияние ряда факторов на возникновение желательного дефекта – блесок. Показано, что натяжение полосы, а также ряд других факторов (толщина полосы, концентрации свинца и сурьмы в цинковой ванне, давление воздуха на верхнем и нижнем ножах, вес покрытия) влияют на возникновение этого дефекта. В [15] получено, что блеск оцинкованного листа увеличивается до скорости движения полосы 100 м/мин и далее имеет тенденцию к уменьшению. Возможно, полученный результат является следствием изменения натяжения, которое сопутствует изменению скорости.

Материалы и методы исследования

Рассматриваемый АНГЦ. Рассматриваемый агрегат непрерывного горячего цинкования функционирует на заводе «ММК Metallurgy» в Турции. Агрегат предназначен для обработки полос толщиной от 0,25 до 3 мм. Технологическая часть агрегата включает в свой состав секции для: очистки полосы в ванне со щелочью; прямого нагрева полосы; термической выдержки в печи косвенного нагрева; закрытого охлаждения в атмосфере защитного газа; нанесения цинкового покрытия; обжата с малым усилием при дрессировке. Значительная часть сортамента (порядка 60%) имеет толщину более 1 мм. Такая продукция обрабатывается при скоростях существенно ниже предельного для агрегата уровня 180 м/мин. Поэтому актуально выявление ограничений производительности, связанных с возникновением дефектов при росте скорости движения полосы.

Анализируемые дефекты. Исходя из известных особенностей влияния натяжения полосы на дефекты, их можно подразделить на две группы. Дефекты первой группы предположительно могут быть связаны с механическим повреждением стальной полосы до или после нанесения цинкового покрытия. Список подобных дефектов для условий рассматриваемого агрегата представлен в **табл. 1**. Ко второй группе отнесем дефекты, на которые может влиять вибрация полосы при прохождении газовых ножей, где происходит удаление лишнего цинка и формируется покрытие требуемой толщины. Такие дефекты показаны в **табл. 2**. Представленные в таблицах дефекты имеют разный уровень допустимости. В **табл. 1, 2** показана вероятность возникновения дефектов для рулонов, отнесенных к браку ($P_{\text{брак}}$, %), где видно, что пятна без покрытия и неравномерность покрытия являются основными недопустимыми дефектами, при которых продукцию обычно относят к браку.

Способ определения сопутствующих обстоятельств дефекта. В рамках данной работы поставлена задача изучения ограничений на скорость движения полосы и, соответственно, производительность. Однако скорость движения полосы выбирают с учетом ее толщины для обеспечения требуемой термической обработки при ограниченной мощности систем нагрева и охлаждения. Вследствие этого различие

скорости для дефектной и недефектной продукции может быть обусловлено связью дефекта с сортаментом, а не скоростью. Для исключения влияния мешающих факторов использовали стратификацию по мешающим параметрам, к которым отнесли вид дефекта, марку стали и толщину полосы. Определение сопутствующих обстоятельств возникновения дефектов проводили в два этапа.

На первом этапе для оценки объединенного воздействия каждого из факторов на частоту возникновения дефектов использовали тест Мантеля-Ханзела с поправкой на непрерывность и тест Вульфа. Тест Мантеля-Ханзела использовали для проверки гипотезы о равенстве всех рисков в стратах единицы (оценка значимости влияния фактора). Тест Вульфа использовали для оценки однородности рисков. В качестве фактора риска принимали среднюю для рулона скорость движения полосы либо перепад скорости за время обработки рулона. По результатам первого этапа отбирали такие дефекты, вероятность появления которых увеличивается с ростом скорости либо ее перепада за время обработки рулона. Например, на **рис. 1** показаны плотности распределения скорости движения полосы при определенной толщине полосы ($h_m = 0,5$ мм) для продукции с дефектом D9 (неравномерность покрытия) и без него для стали DX51D. Вероятность дефекта увеличивается с ростом скорости.

Таблица 1. Дефекты, которые могут быть связаны с механическими повреждениями

Table 1. Defects that may be associated with mechanical damage

Номер	Обозначение (англ. / тур.)	Дефект	$P_{\text{брак}}$, %
Недопустимые дефекты			
D1	Uncoated Spots / Kaplama Almama	Пятна без покрытия	25,90
D2	Damage Marks / Markalama Izi (Darbe Izi)	Следы ударов (надав)	8,40
D3	Dent / Batik (Batma Boslugu)	Вмятины (отпечатки)	4,87
D4	Edge Roughness / Kenar Puruzlulugu	Неровности кромки	2,71
Допустимые дефекты			
D5	Snout Marks / Surtunme Izi	Потертость	6,23
D6	Scratch / Cizik	Царапины	4,06
D7	Sink Roll Marks / Sink Roll Merdane Izi	Следы ролика	2,98
D8	Skin pass mill break-marks / SPM Kirigi	Отметины дрессировки	1,62

Таблица 2. Дефекты, которые могут быть связаны с вибрацией полосы в области газовых ножей

Table 2. Defects that may be associated with strip vibration in the area of gas knives

Номер	Обозначение (англ. / тур.)	Дефект	$P_{\text{брак}}$, %
Недопустимые дефекты			
D9	Rough Coating / Pas Kaynakli Puruzlu Kaplama	Неравномерность покрытия	22,28
Допустимые дефекты			
D10	Ocean Wave / Yuzey Akintisi (Dalgali Kaplama)	Волнообразное покрытие	16,26
D11	Ridge / Ridge	Наплывы цинка	8,94

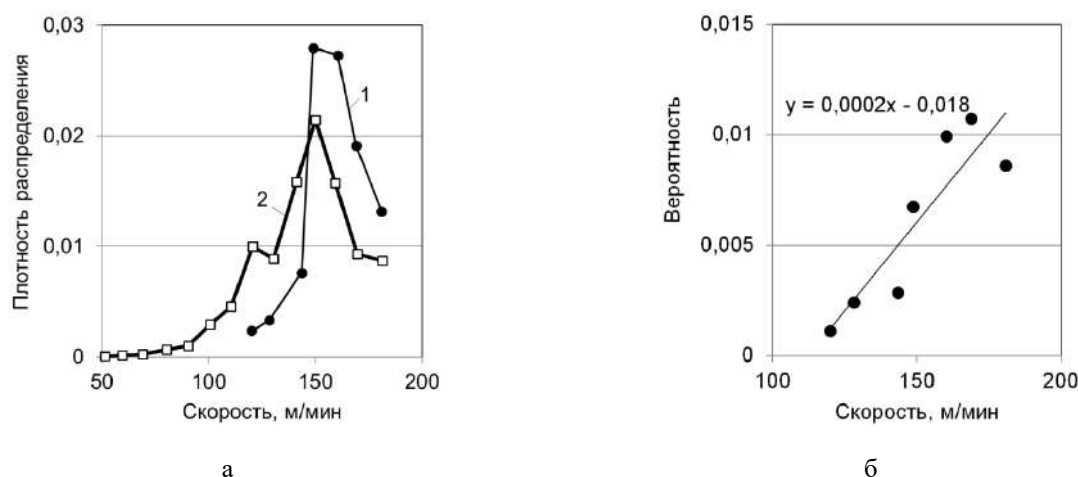


Рис. 1. Плотности распределения скорости (а) для продукции с дефектом (кривая 1) и без него (кривая 2) и зависимость вероятности дефекта от скорости (б) при толщине полосы $h_m \approx 0,5$ мм

Fig. 1. Probability density functions of speed (a) for defective products (curve 1) and non-defective products (curve 2) and the relation between probability of defects and speed (б) at strip thickness $h_m \approx 0.5$ mm

На втором этапе, в зависимости от результатов первого этапа, к мешающим факторам при стратификации дополнительно относили либо скорость, либо ее перепад за время обработки рулона. Для дефектов, возникновение которых может быть связано с вибрацией полосы в области газовых ножей, в качестве мешающего фактора дополнительно учитывали толщину покрытия. Факторы риска на втором этапе характеризуют натяжение полосы на разных участках агрегата.

На обоих этапах гипотезу о равенстве всех рисков в стратах единице (об отсутствии влияния) отвергали, если для всех парных комбинаций страт границы доверительного интервала (расчет по методу Робинса), определяемые вероятностью попадания 95%, не охватывали единицу.

Исходные данные. В качестве исходных данных использовалась информация об агрегированных значениях технологических параметров, которых характеризуют среднее, минимальное и максимальное за время обработки рулона значения параметра, а также данные о наличии у рулонов дефектов за период 2020-2021 годов на заводе «ММК Metallurgy» в Турции. Использовались данные по стали DX51D ([C] < 0,12%; [Si] < 0,5%; [Mn] < 0,6%; [P] < 0,01%; [S] < 0,045%; Ti < 0,3%).

Характеризующие натяжение полосы факторы риска. В качестве факторов, которые характеризуют сопутствующие обстоятельства появления дефекта кроме скорости, толщины полосы и покрытия, приняли ряд величин (табл. 3). Величины представляют собой значения натяжения полосы в различных секциях агрегата, агрегированные за время обработки рулона.

Исходя из проведенного обзора, недостаточное натяжение полосы может являться одной из основных причин появления дефектов. Поэтому выбранные факторы Ф1-Ф4 характеризуют минимальное для рулона натяжение на входе секций. Для оценки влияния управления натяжением в переходных режимах на качество продукции приняли факторы Ф5-Ф8, характеризующие перепад натяжения за время обработки

рулона. Факторы Ф10-Ф13 используются для оценки влияния на качество совместного управления натяжением в соседних секциях.

Полученные результаты и их обсуждение

Дефекты, на возникновение которых влияет скорость движения полосы. После изучения влияния на возникновение дефектов скорости движения полосы и уровня ее изменения за время обработки рулона получено, что с ростом значений данных факторов вероятность появления увеличивается только для некоторых из дефектов (табл. 4).

Дефекты D1, D2, D3, которые предположительно могут быть вызваны механическими повреждениями полосы, демонстрируют связь с изменением скорости при обработке рулона. С ростом скорости вероятность этих дефектов снижается до пренебрежимо малого уровня, что может быть связано с особенностями управления натяжением. Вероятность появления дефектов D9, D11, на которые предположительно влияет вибрация полосы в области газовых ножей, увеличивается с ростом скорости.

Влияние факторов на возникновение дефектов. В табл. 5 указаны факторы риска, которые демонстрируют значимую связь с вероятностью появления дефектов при определенных комбинациях толщины полосы, скорости ее движения либо изменения скорости за время обработки рулона. Из таблицы следует, что вероятность появления дефектов, которые предположительно вызваны механическими воздействиями, демонстрирует связь с натяжением полосы во многих секциях. Связь с вероятностью дефектов D9 и D10 показывает малое число рассматриваемых факторов. Перепад натяжения за время обработки рулона на входе в цинковую ванну (Ф6) и перепад натяжения между секцией дрессировки и правильно-растяжной машиной (Ф12) не показали связи с рассматриваемыми дефектами.

Таблица 3. Факторы для определения сопутствующих обстоятельств появления дефекта
Table 3. Factors for determining accompanying circumstances of the defect

Номер фактора	Величина
Ф1, Ф2, Ф3, Ф4	Минимальное для рулона натяжение полосы на входе в секции: термической обработки; цинковой ванны; дрессировки; правильно-растяжной машины
Ф5, Ф6, Ф7, Ф8	Разница между максимальным и минимальным за время обработки рулона натяжением полосы на входе в те же секции
Ф9	Среднее для рулона натяжение полосы на входе наматывателя
Ф10, Ф11, Ф12, Ф13	Разница между средним за время обработки рулона натяжением на входе соседних секций (Ф10 – разница между натяжением на входе секций термической обработки и цинковой ванны и т.д.)

Таблица 4. Дефекты, вероятность появления которых увеличивается с ростом скорости или уровнем ее изменения за время обработки рулона
Table 4. Defects, whose probability increases with increasing speed or the level of its change during coil coating

Номер дефекта	Дефект	Увеличение вероятности дефекта при		
		росте скорости	снижении скорости	изменении скорости
D1	Участки без покрытия	Нет	Да	Да
D2	Следы ударов (надав)	Нет	Да	Да
D3	Вмятины (отпечатки)	Нет	Да	Да
D9	Неравномерность покрытия	Да	Нет	Нет
D11	Наплывы цинка	Да	Нет	Нет

Таблица 5. Факторы, которые потенциально могут влиять на возникновение дефекта
Table 5. Factors that can potentially influence occurrence of a defect

Дефект	Факторы												
	Ф1	Ф2	Ф3	Ф4	Ф5	Ф6	Ф7	Ф8	Ф9	Ф10	Ф11	Ф12	Ф13
D1 – Участки без покрытия	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+		+
D2 – Следы ударов (надав)	+	+	+	+			+	+	+	+	+		
D3 – Вмятины (отпечатки)	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+		
D9 – Неравномерность покрытия		+	+							+	+		
D11 – Наплывы цинка			+										

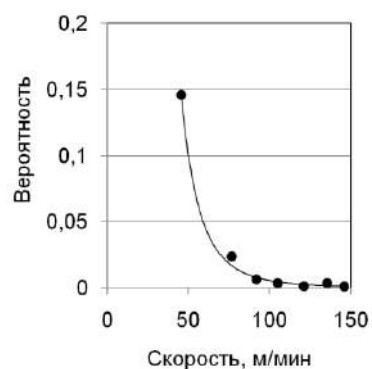
D1, D2, D3 – Участки без покрытия, Следы ударов и Вмятины. Особенности влияния многих факторов схожи для данных дефектов, включая влияние скорости и ее изменения. В качестве примера на **рис. 2** показана зависимость вероятности вмятин от средней скорости и ее перепада за время обработки рулона. Схожие зависимости характерны для всех трех дефектов.

Факторы Ф1-Ф4, Ф9 оказывают схожее влияние на каждый из дефектов D2, D3. Снижение натяжения сопровождается ростом вероятности дефекта для полос толщиной 0,8-1,5 мм, где скорость обработки часто ниже 100 м/мин. В качестве примера на **рис. 3** показаны функции плотности распределения Ф3 для продукции с дефектом D2 и без такого дефекта.

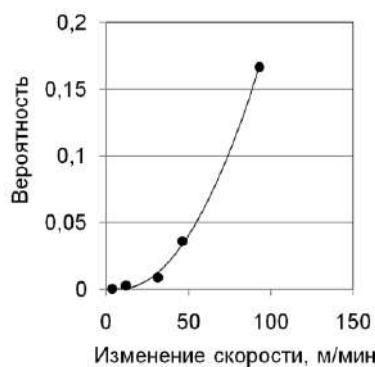
Отмеченная тенденция выполняется также и для дефекта D1 (участки без покрытия). Однако, в отличие

от D2, D3, влияние уровня натяжения на вероятность D2 неоднозначно. При толщине полосы 1,8-2,5 мм повышение натяжения сопровождается ростом вероятности дефекта D1. Данная тенденция выполняется для факторов Ф1, Ф2, Ф4, Ф9.

Факторы Ф5-Ф8 также оказывают схожее влияние на вероятность дефектов D1, D2, D3. С ростом перепада натяжения за время обработки рулона вероятность дефекта увеличивается. Для дефекта D1 условия применимости тенденции зависят от фактора (Ф5 – для полос толщиной более 2 мм; Ф7 – тенденция всегда применима; Ф8 – для полос толщиной 0,8-1,5 мм). Для дефекта D2 тенденция возникает применительно к факторам Ф7-Ф8 при скорости менее 70 м/мин. Для дефекта D3 условия применимости тенденции также зависят от фактора (Ф5, Ф7 – для полос толщиной более 2 мм; Ф8 – при скорости менее 70 м/мин).



а



б

Рис. 2. Зависимости вероятности вмятин (D3) от:
а – скорости при $h_m [0,8; 0,9]$ мм;
б – изменения скорости при $h_m \approx 0,8$ мм и скорости 110 м/мин

Fig. 2. Dependences between the probability of dents (D3) and: a) speed at $h_m [0,8; 0,9]$ mm; б) speed changes at $h_m \approx 0,8$ mm and 110 m/min

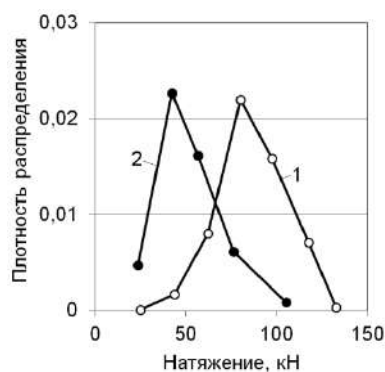


Рис. 3. Функции плотности распределения F_3 для продукции с дефектом D2 (кривая 2) и без такого дефекта (кривая 1) при толщине полосы 0,8-1,2 мм, скорости 55-70 м/мин и весе покрытия 50-70 г/м²

Fig. 3. Distribution density functions F_3 for products with a D2 defect (curve 2) and without such defect (curve 1) at a strip thickness of 0.8-1.2 mm, a speed of 55-70 m/min, and a coating weight of 50-70 g/m²

Изучение влияния натяжения на вероятность дефекта при разном уровне перепада скорости движения полосы ограничено объемом экспериментальных данных. Вследствие этого удалось получить только некоторые индивидуальные для дефектов тенденции. Так, для дефекта D2 при больших перепадах скорости влияние натяжения на вероятность дефекта больше, но только для относительно тонких полос. Для дефекта D3 повышение натяжения при низком перепаде скорости для полос толщиной более 2 мм приводит к росту вероятности дефекта.

Изучение влияния разницы между натяжением полосы на входе соседних секций также показало наличие общей тенденции для дефектов D1, D2, D3. Для полос толщиной 0,8-1,5 мм при скорости менее 70 м/мин дефектная продукция имеет меньшее различие натяжения между соседними секциями. Наиболее сильно эта особенность выражена для дефекта D1 применительно к факторам Φ_{11} - Φ_{12} (рис. 4).

В целом сопутствующие обстоятельства возникновения дефектов D1, D2, D3 в высокой степени схожи. Предположительно дефекты имеют общие причины возникновения, связанные с особенностями управления натяжением.

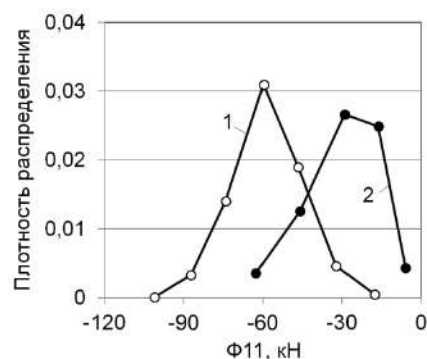


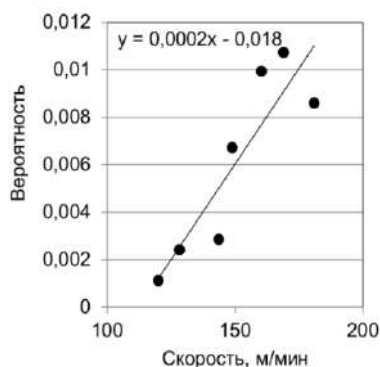
Рис. 4. Функции плотности распределения Φ_{11} для продукции с дефектом D1 (кривая 2) и без такого дефекта (кривая 1) при толщине полосы 0,8-1,2 мм, скорости 45-70 м/мин

Fig. 4. Distribution density functions F_{11} for products with a D1 defect (curve 2) and without such defect (curve 1) at a strip thickness of 0.8-1.2 mm, a speed of 45-70 m/min

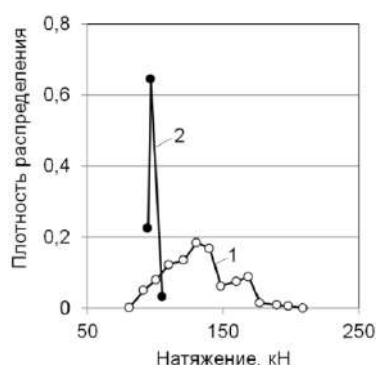
D9 – Неравномерность покрытия. Данный дефект обычно ассоциируется с процессами в цинковой ванне и может быть связан, например, с повышенной температурой металла на входе в ванну и диффузией железа через ингибирующий межфазный слой Fe-Al [16]. Вероятность дефекта увеличивается с ростом толщины и скорости движения полосы (рис. 5, а). Также вероятность дефекта увеличивается с ростом толщины покрытия.

Результаты изучения совместной плотности показали связь вероятности дефекта с факторами Φ_2 и Φ_3 (натяжение перед цинковой ванной и секцией дрессировки). С ростом толщины покрытия все большая

доля дефектов получена при низком натяжении. При большой толщине покрытия (вес 275 г/м^2) все дефекты получены при минимальном используемом для такой продукции натяжении (рис. 5, б).



а



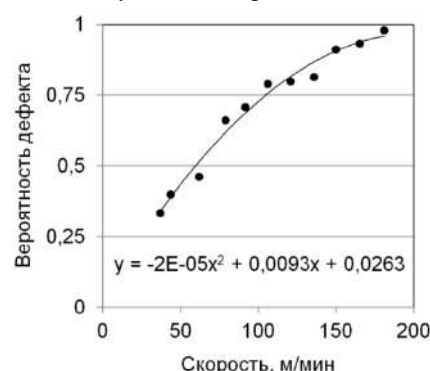
б

Рис. 5. Зависимость вероятности дефекта D9 от скорости при толщине полосы 0,5 мм (а), плотности распределения ФЗ для продукции с дефектом D9 (кривая 2) и без такого дефекта (кривая 1) при толщине полосы 2 мм, скорости 65 м/мин, весе покрытия 275 г/м^2 (б)

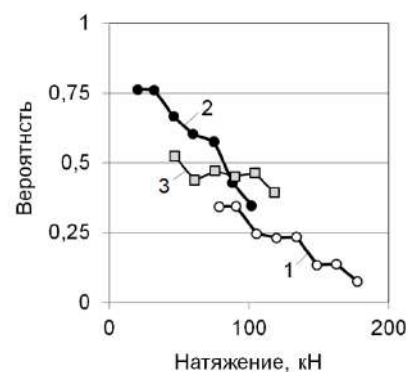
Fig. 5. Dependence between the D9 defect probability and the speed at a strip thickness of 0.5 mm (а), distribution density F3 for products with a D9 defect (curve 2) and without such defect (curve 1) at a strip thickness of 2 mm, a speed of 65 m/min, and a coating weight of 275 г/м^2 (б)

D11 – Наплывы. Данный дефект может быть обусловлен различными причинами. Неровности исходной поверхности, наличие царапин на исходной полосе могут приводить к появлению областей с более толстым покрытием [17, 18]. В [19] указывается, что причиной наплывов является в том числе накопление цинковой пыли в носке выходного желоба печи АНГЦ вследствие пониженной точки росы. Согласно [20], появление донного шлака в ванне цинкования делает расплав более вязким и приводит к появлению наплывов. Авторы [21] связывают наплывы с сильной вибрацией полосы, расплескиванием расплава и забиванием воздушных ножей расплавом, что требует коррекции натяжения и скорости движения полосы.

Изучение исходных данных показало, что со снижением скорости вероятность дефекта снижается (рис. 6, а). Получено, что вероятность возникновения дефекта зависит от толщины полосы только при скорости менее 90 м/мин. Изучение влияния натяжения показало связь с единственным фактором – ФЗ (натяжение на входе секции дрессировки). Получено, что у тонких полос (толщина менее 0,5 мм) изменение натяжения в характерном для таких полос диапазоне не позволяет уменьшить дефект. Для полос с толщиной более 1,5 мм натяжение всегда влияет на возникновение дефекта. С ростом натяжения вероятность возникновения дефекта снижается. При толщине полосы в диапазоне 0,8-1,5 влияние натяжения проявляется при более высоких скоростях движения полосы (рис. 6, б). Полученные результаты позволяют предположить, что одной из причин возникновения наплывов могут быть вибрации.



а



б

Рис. 6. Зависимость вероятности появления наплывов (D11) от: а – скорости при толщине полосы 0,5 мм; б – натяжения на входе секции дрессировки (1 – толщина 1,8-2 мм, скорость 60 м/мин; 2, 3 – толщина 0,8-1,5 мм, скорости соответственно 100-130 и 75-80 м/мин)

Fig. 6. Dependence between the sagging (D11) probability and: а) speed at a strip thickness of 0.5 mm; б) tension at the entry of the skin pass section (1 is a thickness of 1.8-2 mm, 60 m/min; 2, 3 is a thickness of 0.8-1.5 mm, 100-130 m/min and 75-80 m/min, respectively)

Направления совершенствования управления натяжением. Исходя из полученных результатов, для снижения вероятности возникновения дефектов D1, D2 и D3 необходимо повышение натяжения полосы. Однако при управлении натяжением следует учитывать ресурс оборудования. Согласно [8], уменьшение заданного натяжения на участке погружного оборудования приводит к существенному росту срока службы погружного ролика, но низкий уровень натяжения может не обеспечить требуемой устойчивости движения полосы. При этом также следует учитывать усилия при изменении скорости движения полосы. Для выявления сверхнормативных нагрузок на оборудование авторы [8] разработали модель взаимосвязанных электроприводов. Для устранения сверхнормативной нагрузки на погружное оборудование предложено снижение натяжения, что увеличило срок службы погружного ролика. При этом связь предложения с дефектами не рассматривается. В то же время натяжение на данном участке (Ф2, Ф3) оказывает влияние на все дефекты, которые, согласно полученным результатам, имеют связь со скоростью движения полосы и ее перепадами. Обоснованный выбор натяжения на участке требует прогноза ресурса службы погружного оборудования в различных условиях.

По-видимому, натяжение на участке воздушных ножей является одним из немногих факторов, который позволяет уменьшить наплывы цинка при высокой производительности по металлу. Несмотря на то, что данный дефект часто относят к допустимым дефектам, его наличие снижает, согласно [22], коррозионную стойкость на 20%. В то же время увеличение натяжения не является основным способом подавления вибраций. Следует ожидать, что вибрации будут устранены на основе дальнейшего совершенствования систем электромагнитной стабилизации полосы.

Согласно полученным результатам, для дефекта D1 (участки без покрытия) возможен рост вероятности дефекта с увеличением натяжения. Согласно [23], увеличение натяжения может приводить к двум последствиям, которые могут послужить причиной дефекта. Если сила натяжения превышает силу трения, то полоса может проскальзывать по ролику и наступает пробуксовка. Если сила натяжения меньше или равна силе трения, то вследствие увеличения натяжения полоса получит дополнительное удлинение. Так как D1 относится к недопустимым дефектам, то увеличение натяжения для устранения дефектов требует расчетов для определения условий возникновения пробуксовки.

В работе [9] авторы указывают на необходимость минимизации колебаний натяжения в периоды изменения скорости движения полосы. Учитывая наличие связи дефектов D1, D2, D3 с уровнем перепада натяжения за время обработки рулона, решение данной задачи актуально. Авторами [9] определено, что амплитуда колебаний натяжения зависит от темпа изменения скорости, который определяется темпом изменения задания на скорость. По-видимому, наличие

проблем стабилизации натяжения является одним из факторов, затрудняющих использование скорости как ресурса оперативной коррекции режимов термической обработки стали. Несмотря на то, что такие решения известны [6], их применение в настоящий момент может быть связано с ростом доли дефектной продукции. Для обоснованного ограничения темпа изменения скорости требуется дальнейшее изучение его влияния на вероятность возникновения дефектов с использованием временных рядов данных. Основой для определения рационального темпа изменения скорости могут являться модели образования трещин в покрытии, рассмотренные в [24], предполагающие применение метода блочных элементов.

Заключение

В результате работы определены дефекты, вероятность возникновения которых может увеличиться с ростом скорости движения полосы (неравномерность покрытия, наплывы) или уровня ее изменения за время обработки рулона (участки без покрытия, следы ударов, вмятины) вследствие особенностей управления натяжением. Показано, что натяжение полосы на участке цинковой ванны и газовых ножей влияет на множество дефектов. Для обоснованного выбора натяжения необходим прогноз ресурса службы погружного оборудования в различных условиях. Кроме того, следует учитывать, что не только снижение натяжения, но и его рост может являться причиной появления недопустимого дефекта – участков без покрытия.

Получено, что вероятность появления таких недопустимых дефектов, как участки без покрытия, следы ударов, вмятины, зависит от перепадов скорости и натяжения полосы в различных секциях агрегата. С учетом этого целесообразно проведение дальнейших исследований, направленных на снижение колебаний натяжения в периоды изменений скорости и изучение влияния темпа изменения скорости на вероятность возникновения дефектов.

Список источников

1. Освоение производства высокопрочного проката для автомобилестроения в ОАО «ММК» / Никифоров Б.А., Салганик В.М., Денисов С.В., Степанов П.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2006. Т. 16. № 4. С. 41-45.
2. Рябчиков М.Ю., Рябчикова Е.С., Новак В.С. Гибридная модель для упреждающего управления температурой металла при горячем оцинковании стальной полосы // Мехатроника, автоматизация, управление. 2023. Т. 24. №8. С. 421-432.
3. Ryabchikov M.Yu. Selection of steel strip annealing energy-saving conditions in view of the substandard products share // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2020, vol. 55, no. 1, pp. 182-191.
4. Strip cooling control for flexible production of galvanized flat steel / Ryabchikov M.Y., Ryabchikova E.S.,

- Shmanev D.E., Kokorin I.D. // Steel in Translation. 2021, vol. 51, no. 7, pp. 446-455.
5. Sahay S.S., Kapur P.C. Model based scheduling of a continuous annealing furnace // Ironmaking and Steelmaking. 2007, vol. 34, no. 3, pp. 262-268.
6. Kazuhiro Yahiro, Hiroyasu Shigemori, Kazuhiro Hirohata. Development of Strip Temperature Control System for a Continuous Annealing Line // Proceedings of IECON '93 – 19th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics. 2002, pp. 481-486. DOI: 10.1109/IECON.1993.339029
7. Advanced Electric Drive Control System of Continuous Hot-Dip Galvanizing Line / Kornilov G.P., Abdulveleev I.R., Khramshin T.R., Shokhin V.V. // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Sochi, 2020. DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111905
8. Исследование режимов работы взаимосвязанных электроприводов агрегата непрерывного горячего цинкования / Фатхуллин Д.А., Николаев А.А., Камаев А.П., Минеев Е.В., Вахитов Т.Ю. // Известия вузов. Электромеханика. 2009. №1. С. 81-83.
9. Повышение качества регулирования натяжения полосы агрегата непрерывного горячего цинкования / Корнилов Г.П., Абдулвелеев И.Р., Шохин В.В., Храмшин Т.Р., Николаев А.А. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика», 2020. Т. 20. №2. С. 120-126. DOI: 10.14529/power200211
10. Фонтен П. Бесконтактная электромагнитная стабилизация полосы в линиях цинкования // Металлургическое производство и технология. 2010. №2. С. 40-49.
11. Magnetic actuator design for strip stabilizers in hot-dip galvanizing lines: Examining rules and basic tradeoffs / Marko L., Saxinger M., Steinboeck A., Kugi A. // IEEE Industry Applications Magazine. 2020, vol. 26, no. 2, pp. 54-63. DOI: 10.1109/MIAS.2019.2943662
12. Research on the Vibration of Sheet Metal near the Zinc Pot Area in Continuous Hot-dip Galvanizing Line / Peimin Xu, Biao Wang, Jinjie Ye, Haijuan Zhang, Zhilai Huang, Xiaokui Xu // Applied Mechanics and Materials. 2012, vol. 141, pp. 471-477. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.141.471
13. Research on Vibration Control Method of Steel Strip for a Continuous Hot-dip Galvanizing Line / Jian Li, Yun-Hui Yan, Xing-Hui Guo, Yan-Qing Wang // ISIJ International. 2012, vol. 52, no. 6, pp. 1072-1079.
14. Monojit Dutta, Ananya Mukhopadhyay, Shantanu Chakrabarti. Effect of Galvanising Parameters on Spangle Size Investigated by Data Mining Technique // ISIJ International. 2004, vol. 44, no. 1, pp. 129-138.
15. Affecting Factors on Gloss Value for Galvanized Cold Rolled Sheets / Özgür Karakaş, Erdogan Kanca, İbrahim Göçer, Alper Akün, Erkan Püğe, Güzin Müge Lüle, Ali Doğan, Ahmet Özdemir // 3rd Iron and Steel Symposium (UDCS'17). Turkey: Karabuk, 2017, pp. 233-237.
16. Sawaitul Pranay, Chowriwar S.A., Lade I.P. Minimization of Dross Formation During the Continuous Galvanizing Process in the Steel Industry // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. 2012, vol. 2, no. 1, pp. 45-51.
17. Saravanan P., Srikanth S. Surface Defects and their Control in Hot Dip Galvanized and Galvannealed Sheets // International Journal of Advanced Research in Chemical Science (IJARCS). 2018, vol. 5, no. 11, pp. 11-23.
18. İlhami Pektaş. Galvaniz hataları ve çözüm önerileri. Ankara, 2020. 76 p.
19. Клещева С.Е., Касаткина Е.Г. Анализ уровня качества оцинкованного металлопроката в ЛПЦ-11 ПАО «ММК» // Качество в обработке материалов. 2019. Т. 11. №1. С. 18-23.
20. Радионова Л.В., Субботина Ю.М. Преимущества и недостатки способа горячего оцинкования стальной полосы. Проблемы цинкования // Машиностроение: сетевой электронный журнал. 2013. №2. С. 3-9.
21. Бережная Г.А., Заруцкая А.О., Каримова Д.Ю. Анализ качества горячеоцинкованной полосы в ЛПЦ-11 ОАО «ММК» // Качество в обработке материалов. 2016. Т. 6. №2. С. 39-42.
22. Metallurgical assessment of critical defects in continuous hot dip galvanized steel sheets / Azimi A., Ashrafizadeh F., Toroghinejad M.R., Shahriari F. // Surface & Coatings Technology. 2012, vol. 206, no. 21, pp. 4376-4383.
23. Максимов Е.А., Шаталов Р.Л. О настройке натяжных многороликовых устройств при обработке полосового проката // Сталь. 2014. №1. С. 49-51.
24. On the influence of multiple surface defects on the behavior of media of different rheology / Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M., Telyatnikov I.S. // Materials Physics and Mechanics. 2020, vol. 44, pp. 306-315.

References

1. Nikiforov B.A., Salganik V.M., Denisov S.V., Stekanov P.A. Learning the production of high-strength rolled products for the automotive industry at OJSC MMK. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2006;16(4):41-45. (In Russ.)
2. Ryabchikov M.Yu., Ryabchikova E.S., Novak V.S. Hybrid model for metal temperature control during hot dip galvanizing of steel strip. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control]. 2023;24(8):421-432. (In Russ.)
3. Ryabchikov M.Yu. Selection of steel strip annealing energy-saving conditions in view of the substandard products share. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2020;55(1):182-191.
4. Ryabchikov M.Y., Ryabchikova E.S., Shmanev D.E., Kokorin I.D. Strip cooling control for flexible produc-

- tion of galvanized flat steel. *Steel in Translation*. 2021;51(7):446-455.
5. Sahay S.S., Kapur P.C. Model based scheduling of a continuous annealing furnace. *Ironmaking and Steelmaking*. 2007;34(3):262-268.
 6. Kazuhiro Yahiro, Hiroyasu Shigemori, Kazuhiro Hirohata. Development of strip temperature control system for a continuous annealing line. *Proceedings of IECON '93 - 19th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*. 2002;481-486. DOI: 10.1109/IECON.1993.339029
 7. Kornilov G.P., Abdulveleev I.R., Khrumshin T.R., Shokhin V.V. Advanced electric drive control system of continuous hot-dip galvanizing line. 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Sochi, 2020. DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111905
 8. Fatkhullin D.A., Nikolaev A.A., Kamaev A.P., Mineev E.V., Vakhitov T.Yu. Study on the operating modes of interlocked electric actuators of the hot dip galvanizing line. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of Universities. Electromechanics]. 2009;(1):81-83. (In Russ.)
 9. Kornilov G.P., Abdulveleev I.R., Shokhin V.V., Khrumshin T.R., Nikolaev A.A. Improving the quality of strip tension adjustment on the hot dip galvanizing line. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Energetika»* [Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering]. 2020;20(2):120-126. DOI: 10.14529/power200211. (In Russ.)
 10. Fontaine P. Non-contact electromagnetic strip stabilization on galvanizing lines. *Metallurgicheskoe proizvodstvo i tekhnologiya* [Metallurgical Production and Technology]. 2010;(2):40-49. (In Russ.)
 11. Marko L., Saxinger M., Steinboeck A., Kugi A. Magnetic actuator design for strip stabilizers in hot-dip galvanizing lines: Examining rules and basic tradeoffs. *IEEE Industry Applications Magazine*. 2020;26(2):54-63. DOI: 10.1109/MIAS.2019.2943662
 12. Peimin Xu, Biao Wang, Jinjie Ye, Haijuan Zhang, Zhilai Huang, Xiaokui Xu. Research on the vibration of sheet metal near the zinc pot area in continuous hot-dip galvanizing line. *Applied Mechanics and Materials*. 2012;141:471-477. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.141.471
 13. Jian Li, Yun-Hui Yan, Xing-Hui Guo, Yan-Qing Wang. Research on vibration control method of steel strip for a continuous hot-dip galvanizing line. *ISIJ International*. 2012;52(6):1072-1079.
 14. Monojit Dutta, Ananya Mukhopadhyay, Shantanu Chakrabarti. Effect of galvanising parameters on spangle size investigated by data mining technique. *ISIJ International*. 2004; 44(1):129-138.
 15. Özgür Karakaş, Erdogan Kanca, İbrahim Göçer, Alper Akün, Erkan Püğe, Güzin Müge Lüle, Ali Doğan, Ahmet Özdemir. Affecting factors on gloss value for galvanized cold rolled sheets. 3rd Iron and Steel Symposium (UDCS'17). Turkey: Karabuk, 2017, pp. 233-237.
 16. Sawaitul Pranay, Chowriwar S.A., Lade I.P. Minimization of dross formation during the continuous galvanizing process in the steel industry. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2012;2(1):45-51.
 17. Saravanan P., Srikanth S. Surface defects and their control in hot dip galvanized and galvanized sheets. *International Journal of Advanced Research in Chemical Science (IJARCS)*. 2018;5(11):11-23.
 18. İlhami Pektaş. Galvaniz hataları ve çözüm önerileri. Ankara. 2020. ISBN: 978-605-80004-0-7
 19. Kleshcheva S.E., Kasatkina E.G. Analysis of the quality of galvanized steel products at Rolling Shop No. 11 of PJSC MMK. *Kachestvo v obrabotke materialov* [Quality in Materials Treatment]. 2019;11(1):18-23. (In Russ.)
 20. Radionova L.V., Subbotina Yu.M. Advantages and disadvantages of a hot dip galvanizing method for steel strips. *Mashinostroyeniye: setevoy elektronnyy zhurnal* [Mechanical Engineering: Network Electronic Journal]. 2013;(2):3-9. (In Russ.)
 21. Berezhnaya G.A., Zarutskaya A.O., Karimova D.Yu. Analysis of the quality of hot dip galvanized strips at Rolling Shop No. 11 of OJSC MMK. *Kachestvo v obrabotke materialov* [Quality in Materials Treatment]. 2016;6(2):39-42. (In Russ.)
 22. Azimi A., Ashrafizadeh F., Toroghinejad M.R., Shariari F. Metallurgical assessment of critical defects in continuous hot dip galvanized steel sheets. *Surface & Coatings Technology*. 2012;206(21):4376-4383.
 23. Maksimov E.A., Shatalov R.L. Adjusting multi-roll bridles, when treating rolled strips. *Stal* [Steel]. 2014;(1):49-51. (In Russ.)
 24. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M., Telyatnikov I.S. On the influence of multiple surface defects on the behavior of media of different rheology. *Materials Physics and Mechanics*. 2020;44:306-315.

Поступила 13.09.2023; принята к публикации 26.09.2023; опубликована 25.12.2023
Submitted 13/09/2023; revised 26/09/2023; published 25/12/2023

Рябчиков Михаил Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных систем управления, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: mr_mgn@mail.ru. ORCID 0000-0001-5337-0951

Рябчикова Елена Сергеевна – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных систем управления, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: mika.elena@mail.ru. ORCID 0000-0001-6441-1157

Чута Артур Станиславович – студент кафедры автоматизированных систем управления, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: Arturchuta@gmail.com.

Васильева Елена Ивановна – студентка кафедры автоматизированных систем управления, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: ev.magtu@gmail.com.

Емелюшин Алексей Николаевич – доктор технических наук, профессор, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: emelushin@magtu.ru.

Mikhail Yu. Ryabchikov – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Automated Control Systems, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: mr_mgn@mail.ru. ORCID 0000-0001-5337-0951

Elena S. Ryabchikova – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Automated Control Systems, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: mika.elena@mail.ru. ORCID 0000-0001-6441-1157

Artur S. Chuta – student of the Department of Automated Control Systems, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: Arturchuta@gmail.com.

Elena I. Vasilyeva – student of the Department of Automated Control Systems, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: ev.magtu@gmail.com.

Aleksey N. Emelyushin – DrSc (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: emelushin@magtu.ru.

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
 УДК 005.6:004
 DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-4-105-116



КЛЮЧЕВЫЕ АСПЕКТЫ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ПРОЦЕССА СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА

Запорожцев А. В., Хазова Вер. И., Хазова Вик. И.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Особенностью процессов системы менеджмента качества (СМК) является необходимость соответствовать как общим требованиям стандартов ISO 9000, так и требованиям, предъявляемым к конкретному процессу. Современный уровень развития производства характеризуется широким распространением и использованием цифровых технологий. В связи с этим весьма актуальным становится вопрос о том, как можно использовать цифровые технологии для решения задачи реализации требований стандартов ISO к процессам СМК. **Цель работы и методы исследования.** В статье исследуется применение системного подхода в задаче реализации ключевых положений менеджмента качества в цифровых двойниках процессов СМК. Системный подход дает возможность выявить базовые аспекты рассмотрения цифрового двойника процесса СМК, что позволит реализовать в цифровом двойнике процесса СМК как задачи управления производственным процессом, так и задачи управления улучшениями этого процесса. В качестве рекомендаций к разработке цифрового двойника процесса СМК можно привести необходимость учета вариабельности физических процессов и применение цикла PDSA для реализации научного подхода к улучшениям. **Результаты.** Предлагается использовать цифровой двойник процесса СМК в качестве инструмента реализации основного принципа менеджмента качества «Постоянное улучшение». Разработаны принципиальные положения, являющиеся обязательными при реализации всех процессов СМК и обеспечивающие удовлетворение требований стандартов ISO 9000 к процессам СМК. **Практическая значимость.** Имитационное моделирование, на основе которого изучается поведение процесса, позволяет значительно снизить затраты на тестирование улучшений процессов за счет того, что тестированию подвергается не реальный процесс, а его имитационная модель.

Ключевые слова: процесс СМК, цифровой двойник, цифровизация СМК, цикл PDSA, вариабельность процессов, управление процессом

© Запорожцев А. В., Хазова Вер. И., Хазова Вик. И., 2023

Для цитирования

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. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-105-116>



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

KEY ASPECTS OF CREATING A DIGITAL TWIN OF THE QUALITY MANAGEMENT SYSTEM PROCESS

Zaporozhtsev A.V., Khazova Ver.I., Khazova Vik.I.

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). It is typical of quality management system (QMS) processes to comply with both general requirements of standards ISO 9000 and the requirements set for a specific process. The current level of production development is characterized by widespread occurrence and application of digital technologies. In view of this, it is relevant to determine how digital technologies may be used for compliance of QMS processes with ISO standards. **Objective and Methods Applied.** The paper studies a system approach applied to key provisions of quality management in digital twins of QMS processes. The system approach contributes to identifying basic aspects of studying the digital twin of a QMS process to implement in the digital twin of the QMS process both process control and process improvement tasks. Regarding recommendations for developing the digital twin of the QMS process, it is required to factor into variability of physical processes and apply the PDSA cycle to implement a scientific approach to improvements. **Results.** The digital twin of the QMS process is proposed to be used as a tool for complying with a core principle of quality management, namely “continual improvement”. The authors developed fundamental provisions, being mandatory for all the QMS processes and satisfying the requirements of ISO 9000 for QMS processes. **Practical Relevance.** Simulation modeling used as a basis for studying behavior of the process contributes to lower expenses for testing process improvements because testing is attributed to a simulation model, not an actual process.

Keywords: QMS process, digital twin, QMS digitalization, PDSA cycle, process variability, process control

For citation

Zaporozhtsev A.V., Khazova Ver.I., Khazova Vik.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, vol. 21, no. 4, pp. 105-116. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-105-116>

Введение

Впервые концепция того, что впоследствии получило название «цифровой двойник», была предложена в 2002 году M.Grievs и J.Vickers. В ее основу была положена идея о том, что весь массив данных о реальной системе представляет собой самостоятельную информационную систему, повторяющую реальный объект в виртуальном пространстве. Реальная и информационная системы за счет наличия между ними обратных связей являются, таким образом, «двойниками» друг друга. Это позволяет исследовать поведение реального объекта по его цифровой модели и принимать на основании полученной информации управленческие решения, эффективные в той или иной ситуации. Современное представление о «цифровом двойнике» сложилось к 2017 году, когда была опубликована основополагающая в этой области работа [1].

Предложенная концепция нашла широкое применение в различных отраслях промышленности, вследствие чего стали появляться научные работы, посвященные разработке и внедрению цифровых двойников в практику работы предприятий. Однако вопросы совершенствования как самих двойников, так и организации взаимодействия между ними на всех стадиях производства нуждаются в дальнейшем изучении [2]. В этой связи перспективным представляется исследование этих проблем с позиций системного подхода,

поскольку он дает возможность рассматривать отдельный цифровой двойник и как систему (здесь появляется возможность исследовать его состав и структуру), и как элемент системы более высокого уровня, изучая его взаимодействие с другими цифровыми двойниками. Пример применения такого подхода к разработке цифрового двойника конкретного процесса изложен в [3]. Несмотря на преимущества, которые дает системный подход, авторы отмечают проблемы, возникшие в процессе разработки цифрового двойника. Связаны они прежде всего с различиями требованиями стейкхолдеров процесса друг другу, а иногда и противоречащими друг другу требованиям стейкхолдеров процесса как к нему самому, так и к его результатам.

Решить эту проблему позволяет использование в процессе создания цифрового двойника системной инженерии. В [4] описан подход к разработке цифровых двойников с применением концепции MBSE (Model-Based System Engineering – системное проектирование на основе моделей). Её применение упрощает процесс оптимизации системы и способствует росту взаимосвязанности между ее частями. Ключевым фактором успеха в разработке цифрового двойника является начальный этап – этап идентификации требований стейкхолдеров.

Необходимость постоянного отслеживания требований всех стейкхолдеров, а также важность ориентации на потребителя как ключевого стейкхолдера

закреплены в стандарте ISO 9001-2015 «Системы менеджмента качества. Требования» [5]. Выполнение требований стандарта реализуется за счет применения процессного подхода ко всем процессам организации, в том числе процессам управления качеством. Однако, чтобы соответствовать изменившимся в ходе цифровой трансформации процессам разработки и производства продукции, процессы управления качеством также должны быть встроены в цифровую среду предприятия.

К сожалению, инновации в этой области оказались отодвинуты на второй план цифровыми технологическими инновациями [6]. Строго говоря, цифровизации подвергаются только технологии производства, в то время как основополагающие концепции, методы, инструменты управления качеством практически не претерпевают изменений. Таким образом, проблемы цифровизации управления качеством и в целом системы менеджмента качества являются очень актуальными, но публикаций по этой теме, особенно в отечественных источниках, недостаточно.

Целью данной статьи является определение аспектов создания цифрового двойника процесса СМК, которые обеспечат соответствие этой модели базовым принципам менеджмента качества, а также обеспечат работу цифрового двойника в условиях вариативности процессов СМК.

Материалы и методы исследования

Для выявления аспектов создания цифрового двойника процесса СМК необходимо построить онтологическую модель этой предметной области. Такая модель позволит в наглядной форме выявить основные объекты (понятия) этой сферы деятельности и их взаимосвязи, что даст возможность учесть наиболее важные аспекты рассматриваемой проблемы.

Предметная область СМК – это совокупность принципов и понятий, большая часть которых изложена в стандарте ISO 9000-2015 «Основные положения и словарь» [7]. Эти понятия являются базовыми в создании СМК на предприятии. Однако создание цифровых двойников процессов СМК существенно изменяет технологическую базу, на которой будет происходить функционирование СМК предприятия, и это требует описания тех общих понятий, на основе которых будут разрабатываться цифровые двойники конкретных процессов.

Процессы СМК – это те процессы организации,

которые рассматриваются в группе стандартов ISO 9000 и для которых установлены требования к процессам в стандарте ISO 9000-2015. К таким процессам относятся как основные производственные процессы (например, процессы подраздела 8.5 Производство продукции и предоставление услуг), так и вспомогательные (например, процессы подраздела 7 Средства обеспечения) и процессы управления (например, процессы подраздела 8.1 Планирование и управление деятельностью на стадиях жизненного цикла продукции и услуг). Соответствие процессов СМК требованиям является необходимым условием достижения целей организацией.

Стандарт ISO 9001-2015 «Системы менеджмента качества. Требования» [5] определяет семь принципов организации, ориентированной на качественный менеджмент. Наиболее важными в создании цифрового двойника процесса СМК представляются два принципа: процессный подход и постоянное улучшение процессов. Процессный подход требует рассматривать всю деятельность организации как совокупность взаимосвязанных процессов. Каждый отдельный процесс СМК в цепочке процессов организации (рис. 1) имеет следующие элементы:

- источники входов – предшествующие процессы, которые связаны с данным процессом определенным входом;
- входы – материальные объекты и документы, поступающие в процесс СМК и используемые при выполнении операций процесса;
- продукция – материальные объекты и документы, являющиеся результатом процесса СМК;
- получатели продукции – последующие процессы, в которые поступают результаты процесса СМК.

Для управления процессами стандарт рекомендует использовать методологию «Plan-Do-Check-Act» (PDCA), которая понимается как последовательность следующих этапов: планировать (Plan) – устанавливать цели и планы, обеспечивать ресурсами; выполнять планы (Do); отслеживать (Check) – измерять результаты процессов; предпринимать действия (Act) по улучшению показателей выполнения процесса.

Принцип улучшения рассмотрен не так подробно и включает в себя следующие элементы:

- постоянство улучшений;
- развертывание проектов по улучшению;
- признание подтвержденных улучшений.

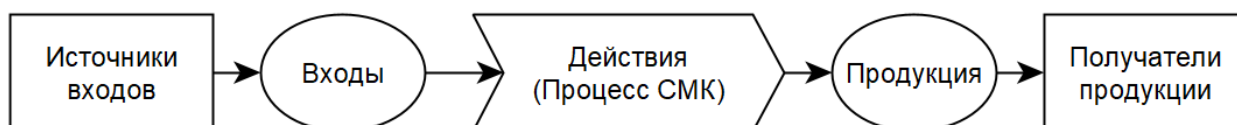


Рис. 1. Схематичное представление элементов отдельного процесса (ISO 9001)

Fig. 1. Schematic representation of the elements of a separate process (ISO 9001)

Более подробно вопросы улучшений рассмотрены в специальной литературе по данной предметной области [8, 9]. Фундамент современного понимания принципов менеджмента, ориентированного на качество, был заложен в работе У. Шухарта [8]. В этой работе признано, что все процессы в природе характеризуются изменчивостью, которая может быть естественной, относительно постоянной, или иметь особые причины, устранение которых должно быть первоочередной задачей менеджмента. Понимание вариабельности является ключевой компетенцией менеджера, обладание которой позволяет избежать многих ошибок при принятии решений. Например, попытки улучшить процесс без оценки его состояния (стабильное или нет) чаще всего не позволяют оценить действенность мероприятий по улучшению. Этот вопрос подробно рассматривается в специальной литературе по статистическому управлению процессами (SPC – Statistical process control) [10].

Э. Деминг [9] рекомендовал в улучшении процесса использовать вариант цикла PDSA, ориентированный на использование научного подхода к улучшениям, в котором улучшение рассматривается как гипотеза, а на третьем этапе (Study) производится сопоставление этой гипотезы с фактическим результатом, полученным на этапе реализации улучшения (Do). Результатом такого сопоставления может быть подтверждение гипотезы или ее опровержение. В том случае, когда гипотеза не подтверждается, цикл PDSA должен быть повторен до получения удовлетворительного соответствия гипотезы (улучшения) объективным данным.

Совокупность базовых принципов СМК, на основе которых предлагается рассматривать задачу создания цифрового двойника процесса СМК, представлена на рис. 2.

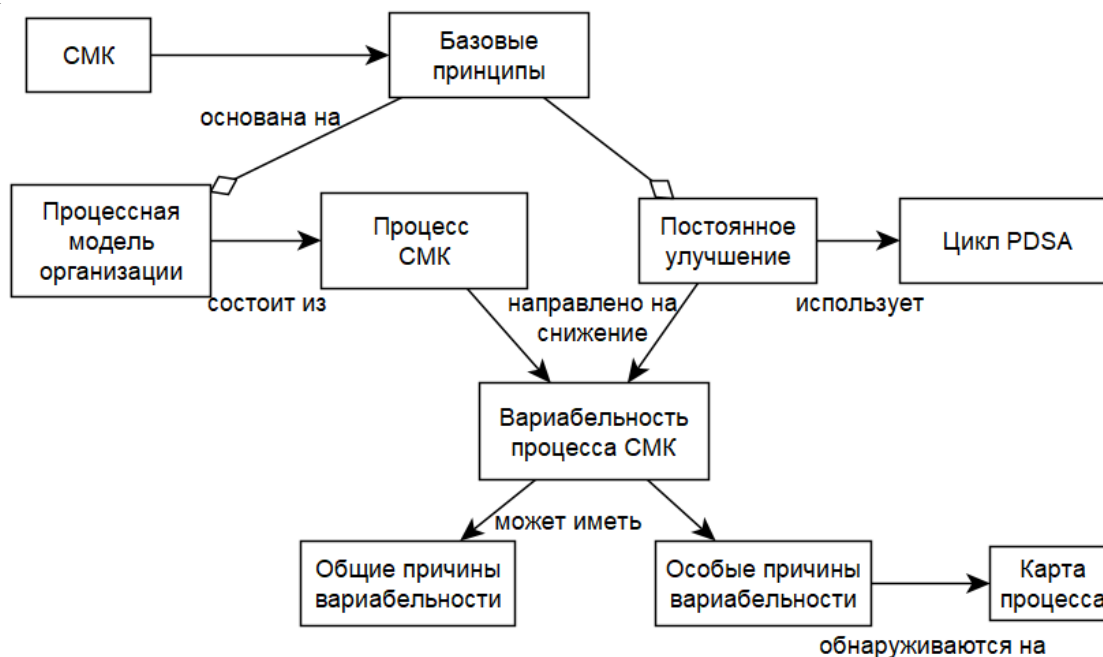


Рис. 2. Модель предметной области процесса СМК
Fig. 2. QMS process subject area model

Анализ данной модели позволяет сформулировать следующие требования к разработке цифрового двойника процесса СМК:

1. Цифровая модель процесса СМК должна строиться как элемент общей процессной модели организации. Однако на первом этапе создания цифровой СМК предприятия невозможно одновременно перейти на цифровые модели большинства процессов СМК, переход должен происходить постепенно. Для реализации данного требования в цифровой модели процесса СМК необходимо предусмотреть интерфейсные модули взаимодействия совокупности цифровых двойников нескольких процессов СМК. При этом необходимо учитывать, что любой процесс СМК одновременно может участвовать во взаимодействии с другими процессами СМК как «поставщик» и как «клиент».

2. Цифровизация СМК требует создания системы мониторинга СМК, основной задачей которой должен быть сбор и обработка данных о всех процессах СМК. Этот элемент цифровизации СМК должен строиться на основе базовых инструментов цифровизации [11]:

- Big Data или большие данные – это структурированные или неструктурированные массивы данных большого объема. Их обрабатывают при помощи специальных автоматизированных инструментов, чтобы использовать для статистики, анализа, прогнозов и принятия решений.

- Data-driven decision making – культура принятия решений на основе данных.

- Искусственный интеллект (AI) – система, способная действовать как человек и постепенно учиться новому, используя собранную информацию.

3. Интеллектуальные возможности цифровой трансформации позволяют значительно повысить эффективность работы по улучшению процессов. Центральным элементом цифрового двойника любого процесса является имитационная модель процесса [12], в которой реализуется модель преобразования входов процесса в результат процесса. Имитационная модель процесса строится на основе достигнутых знаний о процессе и реализует структуру процесса и правила управления. Улучшения могут касаться изменения структуры процесса и изменения правил управления процессом. В большинстве случаев достаточно будет предлагаемые улучшения процесса проверить на имитационной модели, что резко повысит скорость получения подтверждения положительного результата о предлагаемых улучшениях. Важно отметить, что использование цикла PDCA позволяет создавать новые знания о процессе, использование которых позволит систематизировать процесс улучшений.

Таким образом, построение модели предметной области (онтологической модели) создания цифрового двойника процесса СМК позволяет сделать следующие выводы:

1. При разработке цифрового двойника процесса СМК необходимо провести анализ того, как конкретно необходимо рассматривать процесс СМК, чтобы на основе модели такого процесса можно было разрабатывать цифровую модель процесса СМК. Цифровая модель должна соответствовать и принципам стандарта ISO 90001 и конкретным требованиям к процессам СМК.

2. В разработке цифрового двойника процесса СМК пристальное внимание должно быть уделено вариабельности показателей процесса. Прежде всего потому, что понимание вариабельности реальных процессов является базовым элементом TQM, без которого правильно построить качественный менеджмент невозможно. Кроме того, анализ реальной практики производственной деятельности свидетельствует, что менеджеры не воспринимают вариабельность процессов как важный фактор производства. Создание цифровых двойников процессов открывает возможность менеджерам наглядно увидеть влияние

вариабельности на показатели процесса на основе имитационного моделирования процессов.

Полученные результаты и их обсуждение

Определение процесса СМК как объекта разработки цифрового двойника. При создании цифрового двойника процесса СМК встает вопрос об адаптации ключевых понятий стандарта ISO 9000 к концепции цифровой трансформации. Цифровой двойник процесса СМК должен предоставлять персоналу этого процесса достаточное количество сервисов, реализующих основные задачи управления процессом.

Будем рассматривать процесс СМК на основе модели (рис. 3), в которой центральным элементом является подпроцесс «Производственный процесс СМК», процессы клиента и поставщика, а также подпроцесс «Управление процессом СМК».

Подпроцесс «Управление процессом СМК» представляет собой совокупность операций, ориентированных на выработку улучшений процесса в соответствии с принципом постоянного улучшения. Входами в этот процесс являются показатели процесса и требования клиента, а выходами – регламент процесса и требования к поставщику. Требования клиента относятся к выходу Процесса СМК, а требования к поставщику – ко входу. Эти требования реализуют принцип взаимосвязанности процессов, то есть необходимости рассматривать совокупность процессов, имеющих пересекающуюся сферу деятельности. Выполнение операций «Производственного процесса СМК» производится под руководством операционного менеджера, а «Управление процессом СМК» – под руководством владельца процесса.

Таким образом, задача разработки цифрового двойника процесса СМК разделяется на две составляющие: создание цифровой модели «Производственного процесса СМК» и создание цифровой модели «Управления процессом СМК». Каждая из задач имеет разную сферу деятельности, разные принципы работы и поэтому требует разные методы моделирования. Однако эти два подпроцесса единого процесса СМК тесно взаимосвязаны друг с другом и должны рассматриваться совместно.

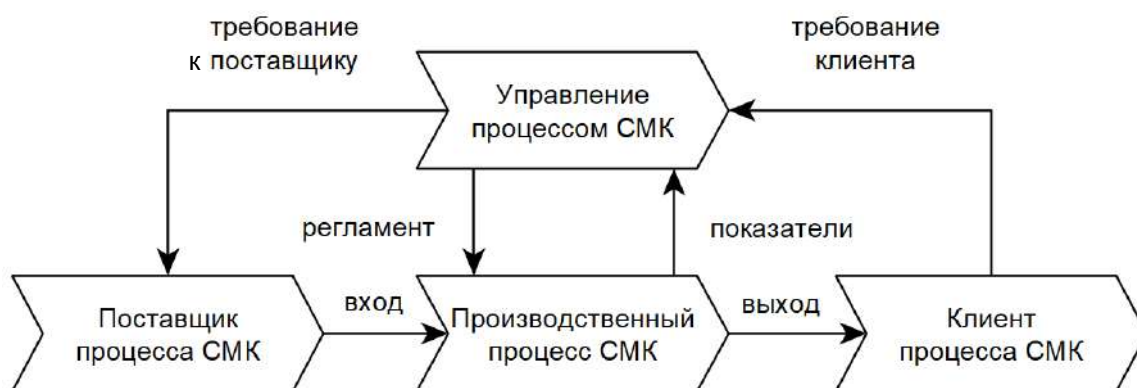


Рис. 3. Модель процесса СМК
Fig. 3. QMS process model

Связь между ними осуществляется через формируемые в «Производственном процессе СМК» Показатели и через вырабатываемый в подпроцессе «Управление процессом СМК» Регламент, который является управлением для «Производственного процесса СМК».

Следовательно, при разработке цифровой модели «Производственного процесса СМК» необходимо обеспечить подготовку необходимых показателей о работе «Производственного процесса СМК», количество и состав которых может меняться в ходе жизненного цикла этого процесса по требованию подпроцесса «Управлять процессом СМК». Эти требования являются составной частью Регламента процесса СМК.

Рассмотрим особенности подпроцесса «Управление процессом СМК» и его основные операции. Основной целью управления процессом СМК является разработка Регламента. Регламент – это совокупность документов, определяющих стандарт выполнения процесса. Концепция У. Шухарта основана на том, что если процесс демонстрирует особые причины вариативности, то такой процесс улучшать невозможно. Необходимо сначала добиться стабильности процесса, когда процесс будет демонстрировать предсказуемость своего поведения. Регламент процесса представляет собой описание нормативных требований к среде выполнения процесса и стандартной работы персонала. Выполнение требований регламента создает условия для стабильной работы процесса.

На рис. 4 представлены основные операции блока «Управлять процессом СМК»:

1. Анализировать процесс СМК (A1). Результатами этого блока являются проблемы процесса, оценка состояния процесса и требования к поставщику. Основными из них являются проблемы процесса – это те нежелательные явления, которые наблюдаются в деятельности процесса и устранение которых должно быть выполнено в первую очередь. Для передачи проблем процесса на выполнение цикла PDSA необходимо добиться стабильного состояния процесса. Одной из причин появления проблем процесса может быть невыполнение требований регламента процесса.

2. Выполнить цикл PDSA (A2). В цифровом двойнике процесса СМК предлагается использовать вариант цикла улучшений, который предложил Деминг.

3. Разработать регламент (A3). Любое улучшение процесса должно быть зафиксировано в регламенте процесса, что создает основу для возможности контролировать реализацию этого улучшения в физическом процессе СМК.

Следовательно, при разработке цифровой модели подпроцесса «Управлять процессом СМК» необходимо обеспечить поддержку работы персонала в повторяющихся циклах PDSA, а также изменений регламента процесса СМК после успешно завершенных циклов PDSA.

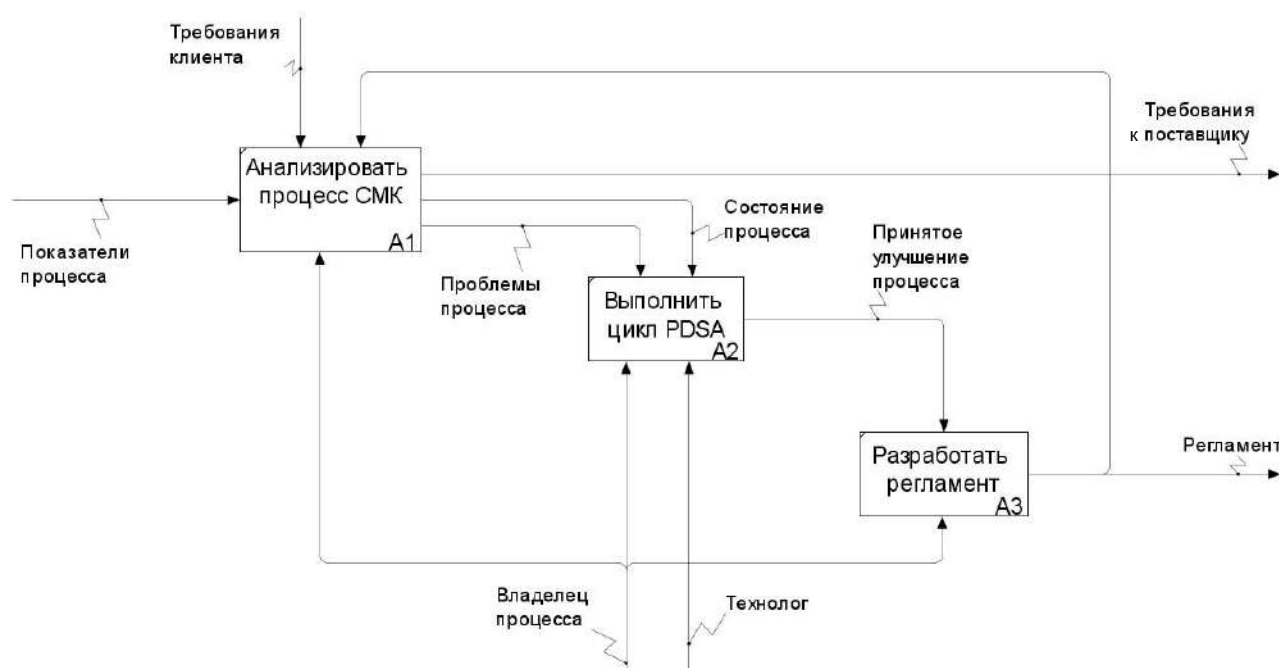


Рис. 4. Декомпозиция функции «Управлять процессом СМК»
Fig. 4. Decomposition of the “QMS process control” function

Проблемы учета вариабельности процессов СМК. Вариабельность (изменчивость) – это общее свойство естественных процессов, которое должно быть учтено при создании цифровой модели процесса СМК. Вариабельность процесса определяется вариабельностью входов в процесс и вариабельностью операций преобразования этих входов в выходы процесса. По выходам процесса судят о состоянии процесса – наиболее важной характеристике процесса. Концепция управления процессами У. Шухарта [8] построена на оценке состояния процесса: стабильного (прогнозируемого) состояния или нестабильного, когда предсказать поведение процесса невозможно. Оценка состояния процесса используется в двух операциях по улучшению процесса [10]: оценке состояния процесса и оценке результатов изменений при реализации улучшений процесса.

Оценка состояния процесса производится на основе мониторинга процесса с использованием карты Шухарта [10] – временной диаграммы изменения показателя процесса. Такими показателями могут быть: численность персонала и его квалификация, используемый материал для процесса, результаты аудитов процесса и другие данные об управлении процессом. По результатам мониторинга процесса дается оценка состояния процесса (стабильное, нестабильное).

Если результаты мониторинга процесса демонстрируют действие особых причин вариабельности, то необходимо такие причины выявить и устранить, так как для процесса, находящегося в нестабильном состоянии, невозможно оценить результаты улучшений, которые разрабатываются на основе цикла PDCA. Шухарт [8] отмечал, что в большинстве случаев выявление этих причин не является трудным, так как эти причины обычно связаны с изменениями в самом управлении процессом. Возникает вопрос: как могут быть выявлены особые причины вариабельности с использованием цифровой модели процесса?

Будем считать, что цифровая модель процесса всегда соответствует стабильному состоянию процесса. Если мониторинг процесса выявил, что на физический процесс действуют особые причины вариабельности, то в цифровом двойнике процесса СМК должен быть модуль, который анализирует данные показателей физического процесса и позволяет владельцу процесса выявить потенциальные особые причины вариабельности. Устранение таких потенциальных причин производится в физическом процессе и контролируется мониторингом процесса. Если действие особых причин вариабельности не было устранено, то цикл выявления потенциальных особых причин вариабельности должен быть повторен.

Для выявления особых причин вариабельности, связанных с изменениями системы, предлагается ориентироваться на те точки карты процесса, в которых поведение процесса меняется. Здесь проблемой является отделение изменений, которые относятся к проявлению вариабельности самого процесса, от изменений, которые связаны с действием особых причин вариабельности. В качестве примера можно привести карту $X - R_m$, построенную авторами по результатам обследования дефектности при производстве деталей на предприятии BORA FASAD (Ставропольский край, г. Лермонтов) (рис. 5).

Анализ карты поведения процесса для индивидуальных значений позволяет сделать вывод, что в первой части рассматриваемого периода действовали особые причины вариабельности – точки процесса в 4 и 5 месяце находятся на верхней границе контрольной карты Шухарта. Во второй части рассматриваемого периода действие этих причин не наблюдается, однако предсказать поведение процесса в следующие периоды невозможно, если особые причины не выявлены и причины их появления не устранены.

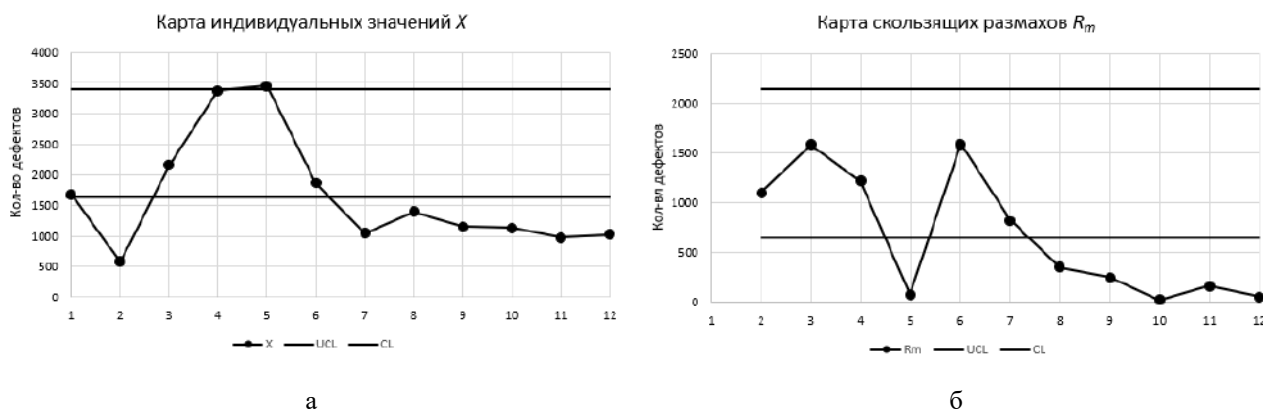


Рис. 5. $X - R_m$ -карта числа дефектов в мебельном производстве: а – индивидуальных значений X ; б – скользящих размахов R_m

Fig. 5. $X - R_m$ chart of the number of defects in furniture manufacturing: а is individual values X ; б is moving range R_m

Одной из проблем создания цифрового двойника процесса СМК является определение методов анализа контрольных карт Шухарта. В настоящее время основным способом анализа карты Шухарта является визуальный анализ, который выполняет владелец процесса. В рамках концепции цифрового двойника процесса появляется возможность существенно повысить результативность SPC за счет автоматизации распознавания признаков действия особых причин вариабельности [13,14].

Если процесс находится в стабильном состоянии, то возможно улучшение процесса на основе цикла PDSA. Для достижения целей улучшения процесса может потребоваться прохождение этого цикла несколько раз. Каждый раз необходимо оценивать действие улучшений на процесс, что требует оценки нового состояния процесса.

С учетом того, что физический процесс является вариабельным, оценка состояния процесса должна иметь статистическую форму описания. В число основных статистических характеристик оценки состояния процесса входят следующие показатели:

- период времени, для которого определена оценка состояния процесса;
- среднее значение показателя состояния процесса;
- распределение случайной величины состояния процесса;
- параметры распределения случайной величины состояния процесса.

Распределение и параметры распределения должны выбираться из множества типовых форм распределения (нормальное, экспоненциальное и т.д.). Для получения оценки состояния процесса необходимо собрать данные о показателях процесса на достаточно длительном отрезке времени и по этим данным рассчитать статистические показатели физического процесса.

Таким образом, выявление текущего состояния процесса, документирование состояний конкретных периодов времени и анализ изменения этих состояний является одной из насущных задач создания цифрового двойника процесса СМК.

Базовые аспекты создания цифровой модели процесса СМК. В предыдущих разделах были рассмотрены аспекты, связанные с особенностями самого процесса СМК и необходимостью учета вариабельности физического процесса, которые должны быть учтены при создании цифрового двойника процесса СМК. Центральным элементом цифрового двойника процесса является его цифровая модель, которая фиксирует текущее стабильное состояние физического процесса, а также представляет основу для анализа улучшений процесса на основе цикла PDSA. Именно в цифровой модели должны быть определены базовые программные элементы, которые обеспечат реализацию ключевых аспектов создания цифрового двойника процесса СМК.

Однако в соответствии с положениями системного подхода к моделированию [4] модель реального процесса (цифровая модель процесса) зависит от цели моделирования, точки зрения на процесс и границ реального процесса, которые определяют набор внутренних элементов модели процесса. Это означает, что в зависимо-

сти от целей моделирования цифровая модель будет включать разные наборы компонентов. В то же время в состав любой цифровой модели процесса обязательно должны входить следующие базовые компоненты:

- 1) показатели процесса;
- 2) состояние процесса;
- 3) управление состоянием процесса.

Показатели процесса. Реальный (физический) процесс необходимо рассматривать как динамическую систему, поведение которой зависит от времени. Под поведением будем понимать изменение параметров процесса во времени. Цифровая модель процесса должна демонстрировать поведение, которое по определенным критериям соответствует поведению физического процесса.

Основной целью разработки цифровой модели процесса является возможность получения параметров реального процесса с определенной точностью и возможность управлять процессом – изменять параметры процесса для достижения большей эффективности функционирования процесса. Характеристики цифровой модели процесса определяются структурой математической модели процесса. Наиболее простой математической моделью процесса является функциональная зависимость вектора выходных параметров процесса Y от вектора входных параметров X :

$$Y = f(X, t), \quad (1)$$

где X – вектор входных параметров процесса; t – время.

Функциональные зависимости могут быть определены в явном виде, и в этом случае они соответствуют действию определенных законов в реальном процессе, например действию закона Ома в электрической цепи. Однако при разработке цифровой модели процесса чаще всего явные функциональные зависимости между входом и выходом неизвестны.

В этом случае используют статистический подход на основе выявления корреляции между вектором выходных параметров и вектором входных параметров. Этот подход активно используется в методологии 6 Сигм [15].

Большими возможностями описания процесса обладают математические модели следующего типа:

$$Y = f(X, Z, t), \quad (2)$$

где Z – вектор внутренних параметров, под которыми понимаются параметры взаимодействия отдельных операций процесса друг с другом.

Данная математическая модель содержит дополнительный параметр Z . Введение вектора внутренних параметров Z , с одной стороны, усложняет модель, а с другой – позволяет разделить функциональную взаимосвязь между входными параметрами X и выходными показателями Y , что поможет точнее описать процесс преобразования. Такая форма математической модели позволяет учесть сложный характер преобразования входных параметров в выходные через совокупность внутренних преобразований:

$$Z = f(X), \quad Y = f(Z). \quad (3)$$

Рассмотрение изменения выходного параметра от времени позволяет в максимальной степени приблизиться к получению решений математической модели, наиболее соответствующих поведению реального процесса.

Для моделирования случайного характера изменения всех параметров процесса необходимо, чтобы все параметры были представлены случайными величинами. Например, входной параметр X должен быть представлен следующей функцией:

$$X = f(M_x, \sigma_x^2, t). \quad (4)$$

Аналогичную форму математической модели будут иметь вектор внутренних параметров Z и вектор параметров результата процесса Y . Таким образом, цифровая модель реального процесса должна включать: вектор входных случайных параметров X и вектор случайных внутренних параметров Z . Использование статистических параметров модели (1) в программах имитационного моделирования будет основано на генерации набора случайных чисел параметров модели, на основании которых по функциональным связям будут получены временные характеристики всех зависимых параметров, которые по форме будут соответствовать реальному процессу. Однако целесообразен ли такой подход к моделированию результата процесса с экономической точки зрения? На этот вопрос можно ответить только на основе анализа реальной задачи разработки цифрового двойника производственного процесса.

Состояние процесса. Альтернативным подходом в разработке цифровой модели процесса является переход к контролю состояния процесса.

$$Y = f(X, Z, Q, t). \quad (5)$$

Введение в модель вектора состояний Q рассматривается как способ снижения размерности математической модели, так как каждое состояние системы соответствует некоторой области изменений входных, внутренних и выходных параметров модели.

Например, параметр процесса может изменяться в широких пределах, однако в модели состояний эти изменения будут соответствовать изменению состояния Q_1 на Q_3 , затем изменению состояния Q_3 на Q_2

и Q_2 на Q_3 . Каждое изменение состояния будет происходить в определенный момент времени. В итоге изменение состояний будет описываться последовательностью моментов времени:

$$T1: Q_1 - Q_3;$$

$$T2: Q_3 - Q_2;$$

$$T3: Q_2 - Q_3.$$

Вектор состояний Q формируется от соотношений между внутренними параметрами Z и некоторыми граничными значениями Z^* , при переходе через которые состояние процесса изменяется. Например, если параметр $Z < Z^*$, то процесс соответствует состоянию Q_1 , если параметр $Z > Z^*$, то процесс соответствует состоянию Q_2 и т.п.

На графике **рис. 6, а** изменение показателя процесса наблюдается в диапазоне от 0 до 45. Так как показатель процесса является случайной величиной, то в каждый момент времени показатель процесса имеет значение, отличающееся от значений показателя в другие моменты времени. Введение характеристики состояния процесса потребует определить граничные значения между разными состояниями (**табл. 1**).

Тогда график изменения состояния процесса будет иметь продолжительные периоды времени, когда состояние процесса не будет изменяться (**рис. 6, б**). Такая форма представления результата моделирования поведения процесса обладает несомненным преимуществом, так как показывает только существенные изменения состояния процесса. Предполагается, что данный способ моделирования поведения процесса упростит разработку управляющих воздействий.

Таблица 1. Граничные значения показателя процесса для разных состояний процесса

Table 1. Boundary values of a process indicator for different process states

Граничные значения показателя процесса		Состояние процесса
Нижняя граница	Верхняя граница	
0	15	1
15	30	2
30	45	3

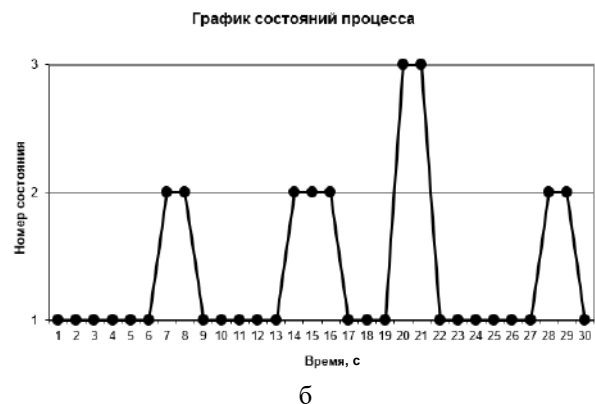


Рис. 6. Временной график изменений: а – параметра процесса; б – состояний процесса

Fig. 6. Timeline of changes: а is a process parameter; б is process states

Состояния процесса должны определяться особенностями поведения каждого процесса и теми целями, которые ставятся в области управления процессом. Например, при управлении производственным потоком могут быть введены три состояния объема незавершенного производства (НЗП): ниже оптимального, оптимальное значение НЗП, выше оптимального.

Управление состоянием процесса. Управление состоянием процесса предполагает изменение его состояния за счет выполнения следующих операций: устранение особых причин вариабельности процесса и улучшение процесса.

Устранение особых причин вариабельности процесса как компонент цифровой модели процесса СМК представляет собой информационную поддержку работы персонала процесса СМК с целью выявления в физическом процессе отклонений от регламента процесса, которые приводят к изменениям в поведении процесса. Однако возможны случаи, когда регламент процесса (все его требования) выполняется, но процесс демонстрирует действие особых причин вариабельности. В этом случае особая причина находится не в действиях персонала, а в физической среде, которая используется в данном процессе СМК. Например, это может быть оборудование, используемое в процессе.

Информационная поддержка операции выявления особых причин вариабельности заключается в генерировании потенциальных причин и рекомендаций по выявлению и подтверждению того, что эта причина действительно оказывает негативное воздействие на стабильность поведения процесса. Данный компонент цифровой модели целесообразно строить как

реализацию функции диагностирования процесса, которая должна быть основана на концепции искусственного интеллекта [16]. Это позволит накапливать знания о причинах, нарушающих стабильное состояние процесса СМК, фиксировать эти случаи в базе знаний и систематически работать над устранением этих причин.

Улучшение процесса СМК как компонент цифровой модели процесса СМК представляет собой алгоритм реализации цикла PDSA, представленного на рис. 7. Важнейшим элементом цикла Деминга PDSA являются знания о процессе. На основе текущих знаний разрабатывается предложение по улучшению. На основе имеющихся знаний можно предсказать результат предложения по улучшению. Результат реализации предложения по улучшению на этапе Study изучается для выявления его соответствия предсказанному результату. Если соответствие не выявлено, цикл повторяется и разрабатывается новое предложение по улучшению. Если соответствие подтверждено, это означает, что появились новые знания о процессе, на основе которых следующий цикл улучшения будет более успешным.

Таким образом, цифровой двойник процесса СМК становится инструментом реализации основного принципа менеджмента качества «Постоянное улучшение» за счет использования имитационного моделирования поведения процесса СМК в разработке улучшений процесса. Использование имитационного моделирования значительно снижает затраты на проведение проверок улучшений, так как эти проверки проводятся не на реальном процессе, а на его имитационной модели.

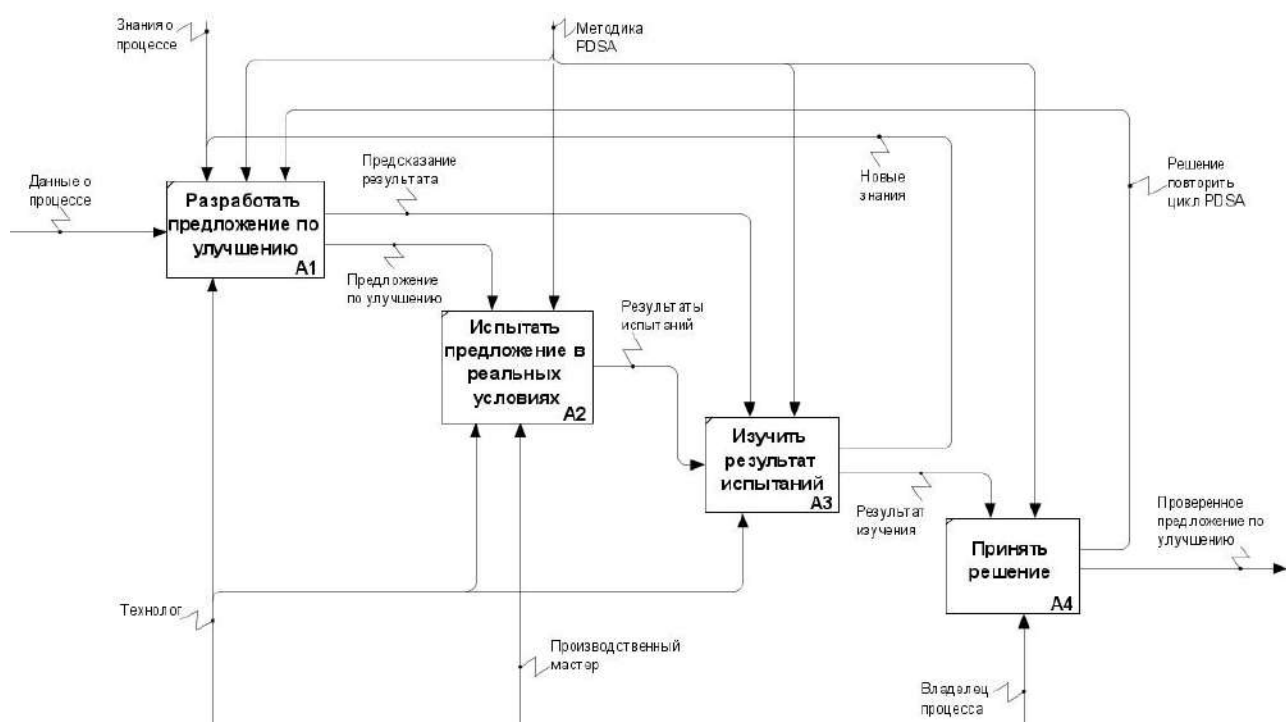


Рис. 7. Взаимосвязь этапов выполнения цикла PDSA

Fig. 7. Relationship between stages of the PDSA cycle

Заключение

В результате проведенного исследования было выработано несколько принципиальных положений, обеспечивающих удовлетворение требований стандартов ISO 9000 к процессам СМК. Наиболее важными положениями являются следующие:

1. Цифровые двойники процессов СМК предприятия должны образовывать сеть процессов, что реализует ключевой подход ISO 9000 – представление организации как совокупности взаимодействующих процессов.

2. Цифровой двойник процесса СМК должен осуществлять мониторинг совокупности как внешних, так и внутренних показателей процесса для оценки его состояния. В том случае, когда процесс СМК находится в нестабильном состоянии, цифровой двойник процесса должен обеспечить владельца процесса достаточной информацией для выявления действия особых причин вариабельности.

3. Цифровой двойник процесса СМК должен обеспечивать интеллектуальную поддержку процесса улучшения процесса на основе цикла PDSA для реализации научного подхода к улучшениям и для управления заданиями в области улучшений.

4. Перечисленные принципиальные положения относятся к подсистеме «Управление процессом СМК» и являются обязательными при реализации всех процессов СМК.

Список источников

1. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches. Springer International Publishing, 2017, pp. 85-113. DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7_4
2. The modelling and operations for the digital twin in the context of manufacturing / Bao Jinsong, Dongsheng Guo, Jie Li, Jie Zhang. // Enterprise Information Systems. 2018, vol. 13, no. 4, pp. 534-556. DOI: 10.1080/17517575.2018.1526324
3. Herkes M.C., Oversluisen G. Using a system approach to model a process digital twin // IFAC-PapersOnLine. 2022, vol. 10, no. 55, pp. 1906-1911. DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.09.677
4. Aditya Akundi, Viviana Lopez. A conceptual model-based Systems Engineering (MBSE) approach to develop Digital Twins // IEEE International Systems Conference (SysCon). Montreal, QC, Canada, 2022, pp. 1-5. DOI: 10.1109/SysCon53536.2022.9773869.
5. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. М.: Стандартинформ, 2020. 32 с.
6. Technology and Quality Management: a review of concepts and opportunities in the Digital Transformation / Carvalho A., Sampaio P., Rebentisch E., Oehmen J. // International Conference on Quality Engineering and Management 2020. Braga, Portugal, 2020, pp. 698-714.

7. ГОСТ Р ИСО 9000-2015. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. М.: Стандартинформ, 2018. 53 с.
8. Walter A. Shewhart. Economic Control of Quality of Manufactured Product. American Society for Quality Control, Milwaukee, Wisconsin, 1980, 501 p.
9. Деминг У. Эдвардс. Выход из кризиса: Новая парадигма управления людьми, системами и процессами: пер. с англ. М.: Альпина Паблишер, 2014. 620 с.: 121 ил.
10. Уилер Д., Чамберс Д. Статистическое управление процессами: Оптимизация бизнеса с использованием контрольных карт Шухарта: пер. с англ. М.: Альпина Паблишер, 2020. 410 с.
11. Кешелав А.В., Хае И.Л. Предмет цифровой экономики и роль цифровых инструментов // Сайт С.П. Курдюмова. URL: https://spkurdyumov.ru/%20digital_economy/predmet-cifrovoj-ekonomiki-i-rol-cifrovyyh-instrumentov/ (дата обращения 15.05.2023)
12. Boschert S. and Rosen R. Digital Twin – The Simulation Aspect. Mechatronic Futures, 2016, pp. 59-74. DOI: 10.1007/978-3-319-32156-1_5
13. Ruey-Shiang Guh. Integrating artificial intelligence into on-line statistical process control // Quality and Reliability Engineering. 2003, vol. 19, no. 1, pp. 1-20. DOI: 10.1002/qre.510
14. Adnan Hassan. An improved scheme for online recognition of control chart patterns // International Journal of Computer Aided Engineering and Technology. 2011, vol. 3, no. 3, pp. 309-321. DOI: 10.1504/IJCAET.2011.040050
15. The Lean Six SIGMA Pocket Toolbook: A Quick Reference Guide to Nearly 100 Tools for Improving Process Quality, Speed, and Complexity / George L.M., Maxey J., Rowlands D., Price M. N.Y.: McGraw-Hill, 2005. 282 p.
16. Управление бизнес-процессами в муниципальных образованиях на основе искусственного интеллекта / Д.В. Скульский, В.Ф. Шуршев, М.И. Шиккульский, Т.И. Гайрабекова // Вестник Астраханского государственного технического университета. 2022. №3. С. 71-79. DOI: 10.24143/2072-9502-2022-3-71-79

References

1. Grieves M., Vickers J. Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. Transdisciplinary perspectives on complex systems: New findings and approaches. Springer International Publishing, 2017, pp. 85-113. DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7_4
2. Bao Jinsong, Dongsheng Guo, Jie Li, Jie Zhang. The modelling and operations for the digital twin in the context of manufacturing. Enterprise Information Systems. 2018;13(4):534-556. DOI: 10.1080/17517575.2018.1526324
3. Herkes M.C., Oversluisen G. Using a system approach to model a process digital twin. IFAC-PapersOnLine. 2022;10(55):1906-1911. DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.09.677

4. Aditya Akundi, Viviana Lopez. A conceptual model-based systems engineering (MBSE) approach to develop digital twins. IEEE International Systems Conference (SysCon). Montreal, QC, Canada, 2022, pp. 1-5. DOI: 10.1109/SysCon53536.2022.9773869
5. State Standard GOST R ISO 9001-2015. Quality Management Systems. Requirements. Moscow: Standardinform, 2020, 32 p. (In Russ.)
6. Carvalho A., Sampaio P., Rebentisch E., Oehmen J. Technology and quality management: a review of concepts and opportunities in the digital transformation. International Conference on Quality Engineering and Management 2020. Braga, Portugal, 2020, pp. 698-714.
7. State Standard GOST R ISO 9000-2015. Quality Management Systems. Fundamentals and vocabulary. Moscow: Standardinform, 2018, 53 p. (In Russ.)
8. Walter A.Sh. Economic control of quality of manufactured product. American Society for Quality Control, Milwaukee, Wisconsin, 1980, 501 p.
9. Deming W.E. *Vykhod iz krizisa: Novaya paradigma upravleniya lyudmi, sistemami i protsessami* [Out of the crisis: A new paradigm of managing people, systems and processes]. Moscow: Alpina Publisher, 2014, 620 p. (In Russ.)
10. Wheeler D.J., Chambers D.S. *Statisticheskoe upravlenie protsessami: Optimizatsiya biznesa s ispolzovaniem kontrolnykh kart Shukharta* [Understanding statistical process control]. Moscow: Alpina Publisher, 2020, 410 p. (In Russ.)
11. Keshelava A.V., Haet I.L. The subject of the digital economy and the role of digital tools. Available at: https://spkurdyumov.ru/%20digital_economy/predmet-cifrovoj-ekonomiki-i-rol-cifrovyyh-instrumentov/ (Accessed on May 15, 2023).
12. Boschert S., Rosen R. Digital twin – The simulation aspect. Mechatronic Futures, 2016, pp. 59-74. DOI: 10.1007/978-3-319-32156-1_5
13. Ruey-Shiang Guh. Integrating artificial intelligence into on-line statistical process control. Quality and Reliability Engineering. 2003;19(1):1-20. DOI: 10.1002/qre.510
14. Adnan Hassan. An improved scheme for online recognition of control chart patterns. International Journal of Computer Aided Engineering and Technology. 2011;3(3):309-321. DOI: 10.1504/IJCAET.2011.040050
15. George M.L., Maxey J., Rowlands D., Price M. The lean Six Sigma pocket toolbook: A quick reference guide to nearly 100 tools for improving process quality, speed, and complexity. New York: McGraw-Hill, 2005, 282 p.
16. Skulsky D.V., Shurshev V.F., Shikulsky M.I., Gairabekova T.I. Management of business processes in municipalities by using artificial intelligence. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Vestnik of Astrakhan State Technical University]. 2022;(3):71-79. (In Russ.) DOI: 10.24143/2072-9502-2022-3-71-79

Поступила 28.07.2023; принята к публикации 16.09.2023; опубликована 25.12.2023
Submitted 28/07/2023; revised 16/09/2023; published 25/12/2023

Запорожцев Александр Валерьевич – кандидат технических наук, доцент,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: wing10@yandex.ru. ORCID 0009-0001-9768-1433

Хазова Вероника Ивановна – кандидат технических наук, доцент,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: viverha@gmail.com. ORCID 0009-0000-6069-9966

Хазова Виктория Ивановна – кандидат технических наук, доцент,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: diplomla@mail.ru. ORCID 0009-0003-2338-1635

Aleksandr V. Zaporozhtsev – PhD (Eng.), Associate Professor,
Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: wing10@yandex.ru. ORCID 0009-0001-9768-1433

Veronika I. Khazova – PhD (Eng.), Associate Professor,
Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: viverha@gmail.com. ORCID 0009-0000-6069-9966

Viktoriya I. Khazova – PhD (Eng.), Associate Professor,
Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: diplomla@mail.ru. ORCID 0009-0003-2338-1635

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 519.21
DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-4-117-123



УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ЭКСПЛУАТАЦИИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ КРАНОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ПСЕВДОСОСТОЯНИЙ

Извеков Ю.А.¹, Рамазанов К.Н.², Гончарова Е.А.¹, Каримова Д.Ф.¹, Шубин И.Г.¹, Смирнова Л.В.¹

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

² Академия наук Республики Башкортостан, Уфа, Россия

Аннотация. Теория случайных процессов имеет обширное поле инженерных приложений. Особое место в этой науке занимают так называемые процессы гибели и размножения. Несмотря на биологическое происхождение данной терминологии этой теории, она с ходу вписывается в существующие технологические процессы. Статья представляет собой продолжение исследований, направленных на инженерное и технологическое приложение теории вероятностей и случайных процессов с целью построения эффективной системы менеджмента качества опасных производственных объектов металлургического предприятия. При анализе эксплуатации металлургических кранов различают несколько состояний – эксплуатация, авария, ремонт и др. В условиях металлургического производства стали становится невозможным прерывание производственного цикла, то есть если кран выходит из строя, его необходимо практически сразу заменить. Для обоснования технологических решений используется метод псевдосостояний процессов гибели и размножения. На основании известных подходов и моделей построена система дифференциальных уравнений Колмогорова, рассчитаны характеристики случайного процесса, математическое ожидание и дисперсия. Показано, что вероятности нахождения крана в стационарном режиме в псевдосостояниях распределены по закону Пуассона. Это показывает независимость распределения интервалов между событиями поступающих на замену кранов. Приведен абстрактный модельный пример расчета характеристик случайного процесса числа эксплуатационных единиц и их временных характеристик. Показано, что вероятность нахождения эксплуатационного состава металлургических кранов в течение года сохранится с вероятностью 0,9985. Предложенный подход может быть использован в текущей повседневной деятельности не только на металлургическом предприятии, но и на других, а также может найти отражение в нормативно-технической документации.

Ключевые слова: псевдосостояние, случайный процесс, металлургический кран, закон Пуассона, вероятность, математическое ожидание, дисперсия

© Извеков Ю.А., Рамазанов К.Н., Гончарова Е.А., Каримова Д.Ф., Шубин И.Г., Смирнова Л.В., 2023

Для цитирования

Управление качеством эксплуатации металлургических кранов на основе метода псевдосостояний / Извеков Ю.А., Рамазанов К.Н., Гончарова Е.А., Каримова Д.Ф., Шубин И.Г., Смирнова Л.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №4. С. 117-123. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-117-123>



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

QUALITY MANAGEMENT OF OPERATION OF METALLURGICAL CRANES BASED ON A METHOD OF PSEUDOSTATES

Izvekov Yu.A.¹, Ramazanov K.N.², Goncharova E.A.¹, Karimova D.F.¹, Shubin I.G.¹, Smirnova L.V.¹

¹ Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

² Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan, Ufa, Russia

Abstract. Random process theory has an extensive field of engineering applications. A special place in this science is occupied by the so-called processes of death and reproduction. Despite the biological origin of this terminology of this theory, it immediately fits into existing technological processes. This paper is a continuation of studies aimed at an engineering and technological application of the theory of probabilities and random processes to build an efficient quality management system for hazardous production facilities of a metallurgical enterprise. When analyzing the operation of metallurgical cranes, we identify several states: operation, failure, repair and others. It is impossible to interrupt the production cycle in steelmaking divisions: if the crane fails, it must be replaced almost immediately. To provide rationale for technological solutions, we use the method of pseudostates of death and reproduction processes. Based on known approaches and models, we built a system of the Kolmogorov differential equations, and calculated the characteristics of the random process, mathematical expectation and dispersion. It is shown that probabilities of a steady state mode of a crane are distributed in pseudostates according to Poisson's law. This shows the independence of the distribution of intervals between the events of registering cranes for replacement. The paper contains a hypothetical model example of calculating the random process characteristics of the number of operating units and their time characteristics. It has been shown that keeping an operating pool of metallurgical cranes during the year will remain with a probability of 0.9985. The proposed approach can be used in current daily activities not only at metallurgical enterprises, but also at others, and also reflected in regulatory and technical documentation.

Keywords: pseudostate, random process, metallurgical crane, Poisson's law, probability, mathematical expectation, dispersion

For citation

Izvekov Yu.A., Ramazanov K.N., Goncharova E.A., Karimova D.F., Shubin I.G., Smirnova L.V. Quality Management of Operation of Metallurgical Cranes Based on a Method of Pseudostates. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 4, pp. 117-123. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-117-123>

Введение

Любое техническое устройство, его конструкция, составляющие элементы может случайным образом переходить из одного состояния в другое:

- s_1 – может успешно эксплуатироваться;
- s_2 – может быть выведено из строя – подвергнуться аварии;
- s_3 – может иметь неисправность и эксплуатироваться или при обнаружении неисправности – ремонтироваться;
- s_i – другие состояния.

Такие переходы подвергнуты случайным факторам и описываются теорией случайных процессов [1, с. 15]. Теория случайных процессов имеет обширное поле инженерных приложений. Авторами проведены исследования состояния s_2 [2, 3] для опасных производственных объектов – металлургических кранов. Так, используя теорему о марковских случайных процессах, найдены предельные вероятности в стационарном режиме для конструкций металлургических кранов. Такой подход обеспечил наметить модель

принятия решений при оценке качества таких сложных технических устройств, которая включала бы стратегию управления риском при аварийных ситуациях и оценки их экономической эффективности для металлургического предприятия. Лучшей моделью управления риском в этом случае является установление режимов технического обслуживания и проектного срока эксплуатации.

Изучение состояний s_1 и s_3 при помощи теории случайных процессов существенно расширяет инженерные приложения этой науки. Здесь интересными представляются псевдосостояния в марковских процессах гибели и размножения.

Цель исследования состоит в следующем: используя известный аппарат теории случайных процессов, уточнить и расширить их применение для изучения металлургических кранов при двух состояниях: s_1 – успешной эксплуатации, s_2 – выведения из эксплуатации (ремонт). Определить этот случайный процесс и обосновать его применение в технологической инженерной практике.

Рассмотрим процесс эксплуатации однотипных сложных технических систем – металлургических кранов. В момент времени $t=0$ на предприятии имелось n таких систем. Анализируя марковские процессы гибели и размножения, видим, что в последнее время основное внимание уделяется определению одномерного закона распределения случайного процесса $X(t)$ – числа эксплуатационных единиц и их временных характеристик. Для технологических и инженерных задач чаще всего интересуются характеристиками случайного процесса: математическим ожиданием, дисперсией, а также корреляционной функцией.

В данном случае $X(t)$ – процесс гибели и размножения, размеченный граф $G(S)$ которого представлен на **рис. 1**.

В данном случае будем рассматривать простой процесс восстановления. Учитывая, что металлургическое производство стали является непрерывным циклом, предполагаем, что при выходе из строя металлургического крана он практически сразу заменяется другим. И это необязательно катастрофическое или аварийное событие. Такие события являются достаточно редкими и рассмотрены в [2, 3]. Причин для замены может быть достаточно: техническое обслуживание, дефекты, обнаруженные при осмотре, поломка и многое другое. Возникает задача: возможно ли с помощью марковского случайного процесса с непрерывным временем и дискретными состояниями составить модель простого процесса восстановления, закон которого бы не был показательным. Эта задача может быть решена с помощью метода псевдосостояний. Будем рассматривать два псевдосостояния: U_0 – кран эксплуатируется, U_1 – кран ремонтируется (не эксплуатируется). Стрелками на **рис. 1** показаны интенсивности ввода в эксплуатацию (поступления) кранов на замену и вывода из эксплуатации (строя, отправления в ремонт).

Полученные результаты и их обсуждение

Задачу определения случайного процесса $X(t)$ будем решать следующим образом [1, с. 157, 4-6].

Составим и решим систему n дифференциальных уравнений Колмогорова, найдем вероятности состояний этого процесса $p_i(t) = P\{X(t) = i\}$, ($i = 0, 1, 2, \dots, n$). Таким образом, будет найден одномерный закон распределения.

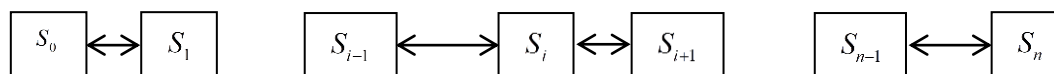


Рис. 1. Размеченный граф состояний $G(S)$

Fig. 1. Labeled graph of states $G(S)$

Найдем характеристики процесса $X(t)$, математическое ожидание и дисперсию по формулам:

$$m_x(t) = M[X(t)] = \sum_{i=0}^n i p_i(t). \quad (1)$$

$$D_x(t) = D[X(t)] = M[(X(t) - m_x(t))^2] = \sum_{i=0}^n i^2 p_i(t) - \left(\sum_{i=0}^n i p_i(t) \right)^2. \quad (2)$$

Алгоритм решения широко известен [1, с. 163, 4-6].

Имеем для псевдосостояний:

$$U_0 = \{s_0^{(0)}, s_1^{(0)}\}, \{s_0^{(1)}, s_1^{(1)}\}. \text{ Интенсивность ввода но-}$$

вых кранов в эксплуатацию $\lambda(t) = at$. Интенсивность снятия с эксплуатации каждого крана данного типа постоянна и равна μ .

Система дифференциальных уравнений Колмогорова для вероятностей состояний, входящих в псевдосостояния [1, с. 191]:

$$\frac{dp_1^{(1)}(t)}{dt} = \mu_1 p_0^{(1)}(t) - \mu_2 p_1^{(1)}(t),$$

$$\frac{dp_1^{(0)}(t)}{dt} = \lambda_1 p_0^{(0)}(t) - \lambda_2 p_1^{(0)}(t),$$

$$\frac{dp_0^{(1)}(t)}{dt} = \lambda_2 p_1^{(0)}(t) - \mu_1 p_0^{(1)}(t),$$

$$p_0^{(0)}(t) + p_1^{(0)}(t) + p_0^{(1)}(t) + p_1^{(1)}(t) = 1.$$

Решение ищется с помощью преобразования Лапласа при начальном условии $p_0^{(0)}(0) = 1$,

$$p_1^{(0)}(0) = p_0^{(1)}(0) = p_1^{(1)}(0) = 0.$$

По математическому ожиданию в соответствии с [1, с. 193] имеем

$$m_x(t) = e^{-\mu t} \int_0^t a x e^{\mu x} dx = \frac{a}{\mu^2} [\mu t - 1 + e^{-\mu t}]. \quad (3)$$

Кривая $m_x(t)$ будет иметь асимптоту

$$\frac{a}{\mu} t - \frac{a}{\mu^2} = \frac{a}{\mu} \left(t - \frac{1}{\mu} \right). \quad (4)$$

График зависимости $m_x(t)$ показана на **рис. 2**.

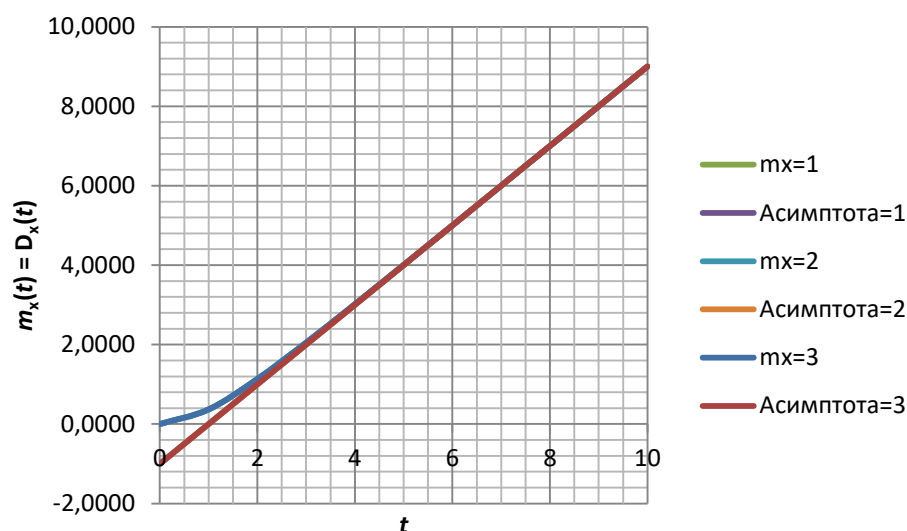


Рис. 2. График зависимости математического ожидания $m_x(t)$. $a = 1, 2, 3$; $\mu = 1, 2, 3$

Fig. 2. Graph of mathematical expectation dependence $m_x(t)$. $a = 1, 2, 3$; $\mu = 1, 2, 3$

График показывает зависимость $m_x(t) = D_x(t)$ для различных a, μ . На графике видно, что при времени $t \approx \frac{3}{\mu}$ начинается практически линейный рост числа эксплуатируемых кранов после начала эксплуатации:

$$m_x(t) = D_x(t) \approx \frac{at}{\mu} - \frac{a}{\mu^2} = \frac{a}{\mu} \left(t - \frac{1}{\mu} \right), \left(t > \frac{3}{\mu} \right). \quad (5)$$

Для бесперебойной эксплуатации цеха металлургического предприятия, на котором расположены M металлургических кранов, необходимо в течение года обеспечить введение в строй не менее n кранов. За n принимаем математическое ожидание. Таким образом, получаем стационарный режим одномерного закона распределения случайного процесса $X(t)$, представляющий закон Пуассона, для которого, как известно, математическое ожидание равно дисперсии:

$$P\{X(t) = i\} = p_i(t) = \frac{[m_x(t)]^i}{i!} e^{-m_x(t)}. \quad (6)$$

Кроме этого, здесь представляется важным и интересным с точки зрения инженерного технологического приложения теории случайных процессов решение еще одной задачи. При интенсивности ввода в эксплуатацию кранов $\lambda = at$ и постоянной интенсивности снятия (вывода) из эксплуатации $\mu = \text{const}$ определить вероятность выполнения производственного плана, если на начало года в эксплуатации было n_1 эксплуатируемых кранов ($t_1 > 0$), то по плану к концу года на момент времени t_2 ($t_2 > t_1$) должно быть n_2 кранов.

Математическое ожидание числа кранов на момент

времени t_2 [1, с. 195] будет

$$m_x(t_2) = e^{-\int_{t_1}^{t_2} \mu dt} \left[\int_{t_1}^{t_2} a x e^{\int_{t_1}^t \mu dt} dx + n_1 \right] = \frac{a}{\mu^2} \left[\mu t_2 - 1 - e^{-\mu(t_2 - t_1)} (\mu t_1 - 1) \right] + n_1 e^{-\mu(t_2 - t_1)}. \quad (7)$$

Дисперсия числа кранов на момент времени t_2 , учитывая, что $D_x(t_1) = 0$, так как $X(t_1) = n_1$, где n_1 – неслучайное число, будет определяться как

$$D_x(t_2) = e^{-\int_{t_1}^{t_2} 2\mu dt} \left[\int_{t_1}^{t_2} (ax + \mu m_x(x)) e^{\int_{t_1}^t 2\mu dt} dx = \frac{a}{2\mu^2} \left[2\mu t_2 - 1 - e^{-2\mu(t_2 - t_1)} (2\mu t_1 - 1) \right] - \frac{a}{2\mu^2} (1 - e^{-2\mu(t_2 - t_1)}) - \frac{a(\mu t_1 - 1)}{\mu^2} \left[e^{-\mu(t_2 - t_1)} - e^{-2\mu(t_2 - t_1)} \right] + n_1 (e^{-\mu(t_2 - t_1)} - e^{-2\mu(t_2 - t_1)}) \right]. \quad (8)$$

При больших значениях $m_x(t_2)$ и при условии $m_x(t_2) - 3\sqrt{D_x(t_2)} > 0$ можем с достаточной точностью считать, что случайная величина $X(t_2)$ распределена по нормальному закону. Соответственно, вероятность выполнения плана находится по формуле

$$P\{X(t_2) > n_2\} = 1 - P\{X(t_2) < n_2\} = 0,5 - \Phi \left(\frac{n_2 - m_x(t_2)}{\sqrt{D_x(t_2)}} \right). \quad (9)$$

Для абстрактного, модельного расчета принимаем

следующие значения: будем считать, что на начало года в цехе располагается n_1 однотипных кранов, необходимо, чтобы количество эксплуатирующихся кранов и на конец года было n_2 , интенсивность ввода сразу заменяющего крана $a=1$, интенсивность выхода из строя (ремонта) $\mu=1$, время имеет размерность года. Вероятность того, что план по их эксплуатации, а собственно, и производственный план будет выполнен, равна $P\{X(t_2) > n_2\} = 0,9985$, что приемлемо со всех точек зрения. При варьировании исходных данных для различных интенсивностей результаты получаются удовлетворительными, но для технологических инженерных целей требуют уточнения.

При больших значениях t_2 закон распределения случайной величины $X(t_2)$ будет приближаться к закону Пуассона с параметрами

$$m_x(t_2) = D_x(t_2) \approx \frac{a}{\mu^2}(\mu t^2 - 1).$$

Таким образом, получаем, что вероятности нахождения металлургического крана в стационарном режиме в псевдосостояниях распределены по закону Пуассона. Это означает независимость распределения интервалов между событиями в потоке кранов на замену.

Данный модельный инженерный подход позволяет с уверенностью говорить о расширении приложения теории случайных процессов в системе менеджмента качества опасных производственных объектов, к которым относятся металлургические краны. Он позволяет выработать новые технологии в повышении их эффективности, в том числе экономической, позволит вносить изменения в [7, 8] и другую нормативно-техническую документацию. Принятие решений в этом случае будет основано на строгом количественном расчете характеристик эксплуатационных единиц.

Заключение

Непрерывный процесс производства стали на металлургических предприятиях представляется достаточно сложным, повышение его эффективности напрямую зависит от эксплуатации участвующих в нем опасных производственных объектов. К таким объектам относятся металлургические краны. Исследование применения метода псевдосостояний процессов гибели и размножения к моделированию их эксплуатационных показателей позволяет решать серьезную народнохозяйственную задачу повышения эффективности металлургического производства.

Металлургические краны при эксплуатации могут находиться в различных состояниях, поэтому важным является математическое моделирование эксплуатации рассматриваемых опасных производственных объектов без остановки (не снятия с эксплуатации), замена (ремонт, снятие с эксплуатации), то есть рассматриваются два псевдосостояния: U_0 – кран экс-

плуатируется, U_1 – кран ремонтируется (не эксплуатируется). Рассчитаны математическое ожидание, дисперсия одномерного закона распределения случайного процесса $X(t)$ – числа эксплуатационных единиц и их временных характеристик.

Выявлено, что процесс эксплуатации металлургических кранов находится в стационарном режиме, а распределение случайного процесса подчиняется закону Пуассона.

Имея постоянные интенсивности ввода в эксплуатацию кранов и снятия (вывода) из эксплуатации, определена вероятность выполнения производственного плана, то есть сколько эксплуатировалось кранов за планируемый период (назначен один год). Установлено, что вероятность того, что производственный план в течение года будет выполнен, равна $P\{X(t_2) > n_2\} = 0,9985$. Также в течение года необходимо обеспечение ввода в эксплуатацию не менее n кранов для непрерывности производственного процесса. Такой факт позволяет говорить о правомерности подхода и применения его в технологическом процессе производства стали при некоторых уточнениях и допущениях. Кроме того, обозначена независимость распределения интервалов событий при потоке кранов на замену.

Моделирование эксплуатации металлургических кранов при помощи теории случайных процессов, качественно адаптированное к металлургическому производству, значительно расширяет ее инженерные приложения и может быть эффективно реализовано на этапах жизненного цикла опасных производственных объектов не только металлургической отрасли, но и других [9, 10].

Список источников

1. Вентцель Е.С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения: учеб. пособие для студ. вузов / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Издательский центр «Академия», 2003. 432 с.
2. Извеков Ю.А. Стандартизация оценки качества специальных металлургических кранов на основе конструкционного риск-анализа // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2021. Т. 23. №2. С. 37-41.
3. Извеков Ю.А. Научно-методическая база оценки качества технических систем металлургического предприятия // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т. 19. №2. С. 98-102. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-98-102>.
4. Рахман П.А., Каяшев А.И., Шарипов М.И. Марковская цепь гибели и размножения в моделях надежности технических систем // Вестник УГАТУ. 2015. Т. 19. №1(67). С. 156-170.
5. Воробьев А.В., Анцев А.В. Методика анализа требований потребителя к качеству грузоподъемных машин // Известия Тульского государственного

- университета. Технические науки. 2023. Вып. 7. С. 253-257.
6. Рахман П.А. Показатели надежности восстанавливаемых систем с заданным порогом аварийного отключения // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 9-3. С. 467-470. URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=7350> (дата обращения: 01.10.2023).
 7. ГОСТ Р 27.303-2021. Надежность в технике. Анализ видов и последствий отказов. М., 2021. 65 с. <https://internet-law.ru/gosts/gost/75897/>
 8. ГОСТ 33169-2014. Краны грузоподъемные. Металлические конструкции. Подтверждение несущей способности. М., 2014. 51 с. <https://internet-law.ru/gosts/gost/60250/>
 9. Управление качеством в системах и процессах машиностроения / О.В. Аникеева, Н.П. Золотухина, А.Г. Ивахненко и др. Курск: ЗАО «Университетская книга», 2014. 208 с.
 10. Управление качеством проектирования и эксплуатации с использованием риск-ориентированного информационного моделирования / Б.В. Бойцов, В.Л. Балановский, М.Ю. Куприков, А.В. Рипецкий, Н.В. Николаева // Качество и жизнь. 2022. №3 (35). С. 86-89.
 11. *stvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021;19(2):98-102. (In Russ.) <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-98-102>
 4. Rakhman P.A., Kayashev A.I., Sharipov M.I. The Markov chain of death and reproduction in models of reliability of technical systems. *Vestnik UGATU* [Vestnik of Ufa State Aviation Technical University]. 2015;19(1(67)):156-170. (In Russ.)
 5. Vorobyev A.V., Antsev A.V. Methodology for analyzing consumer requirements for the quality of lifting machines. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Technical Sciences]. 2023;(7):253-257. (In Russ.)
 6. Rakhman P.A. Reliability indicators of restored systems with a specified emergency shutdown threshold. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy* [International Journal of Applied and Basic Research]. 2015;(9-3):467-470. (In Russ.) Available at: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=7350> (accessed on October 01, 2023).
 7. GOST R 27.303-2021. *Nadezhnost v tekhnike. Analiz vidov i posledstviy otkazov* [Reliability in technology. Failure modes and effects analysis]. Moscow, 2021, 65 p. (In Russ.) Available at: <https://internet-law.ru/gosts/gost/75897/>
 8. GOST 33169-2014. *Krany gruzopodemnye. Metallicheskie konstruksii. Podtverzhenie nesushchey sposobnosti* [Lifting cranes. Steel structures. Demonstration of lifting capacity]. Moscow, 2014, 50 p. (In Russ.) Available at: <https://internet-law.ru/gosts/gost/60250/>
 9. Anikeeva O.V., Zolotukhina N.P., Ivakhnenko A.G. et al. *Upravlenie kachestvom v sistemakh i protsessakh mashinostroeniya* [Quality management in systems and processes of mechanical engineering]. Kursk: CJSC Universitetskaya Kniga, 2014, 208 p. (In Russ.)
 10. Boytsov B.V., Balanovsky V.L., Kuprikov M.Yu., Ripetsky A.V., Nikolaeva N.V. Quality management of design and operation using risk-oriented information modeling. *Kachestvo i zhizn* [Quality and Life]. 2022;(3(35)):86-89. (In Russ.)

References

1. Venttsel E.S., Ovcharov L.A. *Teoriya sluchaynykh protsessov i ee inzhenernye prilozheniya: ucheb. posobie dlya stud. vuzov* [Theory of random processes and its engineering applications: Textbook for university students]. Moscow: Academy Publishing Center, 2003, 432 p. (In Russ.)
2. Izvekov Yu.A. Standardization of quality assessment of special metallurgical cranes based on a structural risk analysis. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2021;23(2):37-41. (In Russ.)
3. Izvekov Yu.A. Scientific and methodological base for assessing the quality of technical systems of a metallurgical enterprise. *Vestnik Magnitogorskogo gosudar-*

Поступила 04.09.2023; принята к публикации 30.10.2023; опубликована 25.12.2023
Submitted 04/09/2023; revised 30/10/2023; published 25/12/2023

Извеков Юрий Анатольевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой прикладной математики и информатики, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: yuriy.izvekov@mail.ru. ORCID 0000-0002-1892-4055

Рамазанов Камиль Нуруллаевич – доктор технических наук, профессор, президент Академии наук Республики Башкортостан, Академия наук Республики Башкортостан, Уфа, Россия. Email: kaftm@ugatu.su.

Гончарова Екатерина Анатольевна – студентка, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: ea_gonch@mail.ru.

Каримова Диана Флюоровна – студентка, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: karimovad39@gmail.com.

Шубин Игорь Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологий обработки материалов, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: shubin64@mail.ru.

Смирнова Лариса Викторовна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной математики и информатики, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: smirnova20@bk.ru. ORCID 0000-0001-6850-6882

Yury A. Izvekov – DrSc (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Applied Mathematics and Information Science, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: yurij.izvekov@mail.ru. ORCID 0000-0002-1892-4055

Kamil N. Ramazanov – DrSc (Eng.), Professor, President of the Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan, Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan, Ufa, Russia. Email: kaftm@ugatu.su.

Ekaterina A. Goncharova – student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: ea_gonch@mail.ru.

Diana F. Karimova – student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: karimovad39@gmail.com.

Igor G. Shubin – PhD (Eng.), Associate Professor, Department of Materials Processing Technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: shubin64@mail.ru.

Larisa V. Smirnova – PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Department of Applied Mathematics and Information Science, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: smirnova20@bk.ru. ORCID 0000-0001-6850-6882

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 658.5
DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-4-124-131



АПРОБАЦИЯ МЕТОДА «SERVQUAL» ПРИ ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА УСЛУГ В ОБЛАСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

Мусабиров Л.А.^{1,2}, Галимов Ф.М.¹

¹ Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, Казань, Россия

² ВНИИР – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», Казань, Россия

Аннотация. Актуальность работы. При проведении анализа и совершенствования системы менеджмента качества организации важно учитывать результаты оценки качества предоставляемых услуг. Внедрение мероприятий по оценке качества услуг в систему менеджмента качества (СМК) организации позволяет получить необходимые данные для анализа и принятия управленческих решений, направленных на улучшение качества оказываемых услуг. Одним из широко распространённых методов оценки качества услуг является метод «SERVQUAL». **Цель работы.** Определение возможности применения метода «SERVQUAL» при оценке качества услуг в области обеспечения единства измерений (ОЕИ). **Используемые методы.** В работе проведена апробация метода «SERVQUAL» для оценки качества услуг в области ОЕИ. **Новизна.** Получены эмпирические данные о применении метода «SERVQUAL» для оценки качества услуг в области ОЕИ, проведен анализ полученных данных. **Результат.** На основе разработанных анкет для проведения оценки качества услуг в области ОЕИ определены значения критериев оценки качества оказания услуг с применением метода «SERVQUAL», проведено сравнение ожиданий и восприятий потребителя от оказания услуг, приведена интерпретация полученных данных. Авторами даны практические рекомендации по использованию данного метода для организаций, осуществляющих деятельность по оказанию услуг в области ОЕИ. Проведен SWOT-анализ для оценки возможности применения метода «SERVQUAL». **Практическая значимость.** Полученные в ходе исследования данные могут быть применены организациями, оказывающими услуги в области ОЕИ при разработке и внедрении мероприятий по оценке качества услуг в области ОЕИ в СМК организации.

Ключевые слова: качество, оценка качества, качество услуг, методика оценки качества, обеспечение единства измерений, SERVQUAL, система менеджмента качества, удовлетворенность потребителей

© Мусабиров Л.А., Галимов Ф.М., 2023

Для цитирования

Мусабиров Л.А., Галимов Ф.М. Апробация метода «SERVQUAL» при оценке качества услуг в области обеспечения единства измерений // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №4. С. 124-131. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-124-131>



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

EVALUATING THE SERVQUAL METHOD IN ASSESSING THE QUALITY OF SERVICES IN THE FIELD OF ENSURING UNIFORMITY OF MEASUREMENTS

Musabirova L.A.^{1,2}, Galimov F.M.¹

¹ Tupolev Kazan National Research Technical University – KAI, Kazan, Russia

² All-Russian Research Institute for Flow Metering – Branch of Mendelev All-Russian Research Institute for Metrology, Kazan, Russia

Abstract. Relevance. When analyzing and improving an organization's quality management system, it is important to take into account the results of assessing the quality of the services provided. The introduction of measures to assess the quality of services into the organization's quality management system (QMS) contributes to obtaining the necessary data for analyzing and making management decisions aimed at improving the quality of services provided. One of the widely used methods for assessing the quality of services is the SERVQUAL method. **Objective.** The study is aimed at determining the possibility of using the SERVQUAL method, when assessing the quality of services in the field of ensuring uniformity of measurements (EUM). **Methods Applied.** The SERVQUAL method was tested in assessing the quality of services provided to ensure uniformity of measurements. **Originality.** The authors obtained empirical data on the application of the SERVQUAL method for assessing the quality of services in the field of EUM, and analyzed the data obtained. **Result.** Based on the developed questionnaires for assessing the quality of services in the field of ensuring uniformity of measurements, the authors determined values of the criteria for assessing the quality of services, using the SERVQUAL method, compared expectations and perceptions of the consumer from the provision of services, and interpreted the data obtained. The authors gave practical recommendations on the use of this method for organizations engaged in providing services in the field of EUM. A SWOT analysis was carried out to assess the possibility of using the SERVQUAL method. **Practical Relevance.** The data obtained during the study can be used by organizations providing services to ensure uniformity of measurements in developing and implementing measures to assess the quality of services in the field of EUM in the organization's QMS.

Keywords: quality, quality assessment, service quality, quality assessment methodology, ensuring uniformity of measurements, SERVQUAL, quality management system, customer satisfaction

For citation

Musabirova L.A., Galimov F.M. Evaluating the SERVQUAL Method in Assessing the Quality of Services in the Field of Ensuring Uniformity of Measurements. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 4, pp. 124-131. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-124-131>

Введение

Оценка качества услуг является важным вопросом, для решения которого требуется постоянное совершенствование применяемых методов. За последнее десятилетие значительно возросло число организаций, оказывающих услуги в области ОЕИ. В условиях конкурентной среды, сложившейся на современном рынке, качество оказания услуг является значимым фактором и определяет позиции на рынке. Изучение информации об изменении внешних факторов, получение обратной связи для своевременного понимания потребностей, мониторинга удовлетворенности потребителей, проведение оценки качества оказания услуг, разработка процедур взаимодействия с потребителями являются основой современной эффективной стратегии развития организации. Поэтому для организаций, оказывающих услуги в области ОЕИ [1], предоставление услуг, отвечающих требованиям потребителя, является приоритетным направлением деятельности.

В соответствии с ГОСТ Р ИСО 9000 «услуга – результат процесса организации с, по крайней мере, одним действием, обязательно осуществленным при взаимодействии организации и потребителя» [2].

Под качеством услуг понимается совокупность характеристик или показателей качества услуги, определяющих ее способность удовлетворять установленные или предполагаемые потребности потребителя [3].

Вопрос о том, как проводить оценку качества услуг, является актуальным, на момент подготовки данной статьи в поисковой системе Google по указанной теме насчитывается около 1200 запросов за последний год.

Сложность проведения оценки качества услуг, в том числе услуг в области ОЕИ, обуславливается такими причинами, как:

- 1) отсутствие возможности однозначной количественной оценки характеристик ввиду неосвязаемости;
- 2) для проведения оценки в большинстве случаев необходимо привлечение экспертов;

3) различные услуги имеют свои особенности, которые отличают их друг от друга;

4) для оценки качества услуг необходимо определение множества показателей;

5) отсутствие возможности повторного воспроизведения услуг с высокой точностью;

6) отсутствие стадии хранения или возможности возврата услуг;

7) сбор данных для проведения оценки требует выделения дополнительных временных и человеческих ресурсов.

При разработке и внедрении процедуры оценки качества услуг необходимо учитывать эффективность и достоверность метода, отсутствие необходимости привлечения большого объема дополнительных ресурсов и доступность выбранного метода в реализации.

Целью данного исследования является анализ применения метода «SERVQUAL» в различных сферах оказания услуг, апробация метода «SERVQUAL» для оценки качества услуг в области ОЕИ, интерпретация полученных результатов и предоставление рекомендаций по оценке качества услуг.

Состояние вопроса и постановка проблемы

Деятельность организаций, оказывающих услуги в области ОЕИ, таких как калибровка и поверка средств измерений, регламентируется нормативно-правовыми актами и документами в области стандартизации. Так, например, для проведения работ по поверке средств измерений организация должна быть аккредитована на проведение данных работ согласно [4] на соответствие требованиям [5] и осуществлять деятельность, регламентированную Приказом Минпромторга России от 31 июля 2020 г. № 2510 [6]. Для калибровочных лабораторий деятельность в области ОЕИ должна соответствовать [7].

Для организаций, оказывающих услуги в области ОЕИ, такие как поверка и калибровка средств измерений, установлены требования к проведению мониторинга и оценки качества оказания услуг. В соответствии с п. 46 приказа Минэкономразвития России от 26 октября 2020 г. № 707 [5] в документах системы менеджмента качества, таких как руководство по качеству, стандарты организации или иных документах, должен быть описан порядок управления качеством услуг области ОЕИ, установленных областью аккредитации. Данная процедура должна включать планирование работ по контролю и оценке качества результатов работ в области ОЕИ и их анализ. Также во внутренних документах необходимо установить порядок взаимодействия с потребителем для совершенствования СМК. В п. 7.7 [7] приведены положения о необходимости проведения контроля и оценки деятельности организаций в области ОЕИ. По результатам, полученным в ходе мониторинга результатов проведения калибровки средств измерений, должны вестись записи, необходимые для выявления изменений, при этом по

возможности рекомендуется применение статистических методов для анализа результатов. Также в п. 8.6 [7] приведены требования, направленные на получение организацией обратной связи от заказчиков, включая положительную и отрицательную обратную связь, которую необходимо анализировать и применять для совершенствования системы менеджмента организации и улучшения качества оказываемых услуг.

Однако в настоящий момент не установлен единый подход к проведению мониторинга и оценки качества оказания услуг в области ОЕИ. Таким образом, организациям необходимо самостоятельно разработать и внедрить метод оценки качества услуг в СМК.

Анализ имеющихся результатов исследований [8-10] показал, что наиболее распространенным методом оценки качества услуг в различных сферах деятельности является метод «SERVQUAL». В то же время информация о применении данного метода при оценке качества услуг в области ОЕИ отсутствует.

В связи с этим в ходе проведения исследования необходимо было рассмотреть возможность применения метода «SERVQUAL» при оценке качества услуг в области ОЕИ.

Материалы и методы исследования

Метод «SERVQUAL» заключается в опросе потребителей услуг. Для проведения опроса используется анкета, которая состоит из двух разделов, в каждом из которых приведено двадцать два утверждения, относящиеся к качеству услуг в соответствии со следующими критериями:

1) уверенность – необходимая квалификация и навыки персонала, вызывающие доверие и уверенность потребителя;

2) эмпатия – сопереживание, предоставление индивидуального внимания каждому потребителю и проявление заботы;

3) надёжность – предоставление услуг в соответствии с требованиями потребителя, гарантия надежности результатов;

4) отзывчивость – стремление оказать помощь, поддержку при оказании необходимых услуг;

5) материальность – инфраструктура, оборудование, персонал, материалы и другие ресурсы, используемые при оказании услуг [11].

Потребителей просят отразить свое мнение по каждому из 22-х утверждений по пятибалльной шкале Лайкерта, учитывающей степень согласия респондента с утверждением. Оценка заключается в заполнении анкет (разделов анкеты), в первой анкете потребитель оценивает восприятие от оказания услуг, во второй потребитель предоставляет информацию о своих ожиданиях от оказания услуг. Анкета для проведения оценки качества услуг в области ОЕИ (Восприятие) приведена в **табл. 1**, анкета для проведения оценки качества услуг в области ОЕИ (Ожидание) приведена в **табл. 2**.

Таблица 1. Анкета для проведения оценки качества услуг в области ОЕИ (Восприятие)
 Table 1. Questionnaire for assessing the quality of services in the field of EUM (Perception)

Тип, № п/п	Частные показатели качества услуг в области ОЕИ	Восприятие				
М.1	Удобное расположение организации	5	4	3	2	1
М.2	Наличие необходимого оборудования	5	4	3	2	1
М.3	Внешний вид сайта и информационных материалов	5	4	3	2	1
М.4	Внешний вид документов, выдаваемых по результатам оказания услуг	5	4	3	2	1
Н.5	Оказание услуг в назначенный срок	5	4	3	2	1
Н.6	Надежная репутация организации	5	4	3	2	1
Н.7	Отсутствие ошибок и неточностей в работе	5	4	3	2	1
Н.8	Высокая компетентность персонала	5	4	3	2	1
Н.9	Быстрое получение обратной связи	5	4	3	2	1
О.10	Персонал проявляет отзывчивость при согласовании сроков оказания услуг	5	4	3	2	1
О.11	Персонал организации всегда помогает с решением вопросов и проблем	5	4	3	2	1
О.12	Персонал реагирует на просьбы заказчиков	5	4	3	2	1
О.13	Между клиентами и персоналом организации существует атмосфера доверия и взаимопонимания	5	4	3	2	1
У.14	Персонал предоставляет все необходимые разъяснения и консультации по вопросам предоставления услуг	5	4	3	2	1
У.15	Персонал вежлив по отношению к заказчикам	5	4	3	2	1
У.16	К заказчикам проявляется индивидуальный подход	5	4	3	2	1
У.17	Доверие к результатам оказываемых услуг	5	4	3	2	1
С.18	Персонал организации проявляет личное участие в решении вопросов заказчика	5	4	3	2	1
С.19	Персонал знает потребности заказчика	5	4	3	2	1
С.20	Персонал клиентоориентирован	5	4	3	2	1
С.21	Индивидуальное внимание каждому заказчику и высокий уровень обслуживания	5	4	3	2	1
С.22	Удобное время работы	5	4	3	2	1

Таблица 2. Анкета для проведения оценки качества услуг в области ОЕИ (Ожидание)
 Table 2. Questionnaire for assessing the quality of services in the field of EUM (Expectation)

Тип, № п/п	Частные показатели качества услуг в области ОЕИ	Ожидание				
М.1	Организация должна иметь удобное расположение	5	4	3	2	1
М.2	Организация должна располагать необходимым оборудованием	5	4	3	2	1
М.3	Внешний вид сайта и информационных материалов должен быть привлекательным	5	4	3	2	1
М.4	Внешний вид документов, выдаваемых по результатам оказания услуг, должен быть опрятным	5	4	3	2	1
Н.5	Услуги должны быть оказаны в назначенный срок	5	4	3	2	1
Н.6	Организация должна иметь надежную репутацию	5	4	3	2	1
Н.7	В работе не должно быть ошибок и неточностей	5	4	3	2	1
Н.8	Персонал должен быть компетентным	5	4	3	2	1
Н.9	Организация должна быстро предоставлять обратную связь	5	4	3	2	1
О.10	Персонал должен проявлять отзывчивость при согласовании сроков оказания услуг	5	4	3	2	1
О.11	Персонал организации должен помогать с решением вопросов и проблем	5	4	3	2	1
О.12	Персонал должен реагировать на просьбы заказчиков	5	4	3	2	1
О.13	Между клиентами и персоналом организации должна существовать атмосфера доверия и взаимопонимания	5	4	3	2	1
У.14	Персонал должен предоставлять все необходимые разъяснения и консультации по вопросам предоставления услуг	5	4	3	2	1
У.15	Персонал должен быть вежлив по отношению к заказчикам	5	4	3	2	1
У.16	К заказчикам должен проявляться индивидуальный подход	5	4	3	2	1
У.17	Должно быть доверие к результатам оказываемых услуг	5	4	3	2	1
С.18	Персонал организации должен проявлять личное участие в решении вопросов заказчика	5	4	3	2	1
С.19	Персонал должен знать потребности заказчика	5	4	3	2	1
С.20	Персонал должен быть клиентоориентирован	5	4	3	2	1
С.21	Должно быть уделено индивидуальное внимание каждому заказчику и высокий уровень обслуживания	5	4	3	2	1
С.22	Время работы должно быть удобным	5	4	3	2	1

Каждый раздел анкеты сопровождается подробной инструкцией по заполнению для однозначного понимания порядка заполнения анкеты и исключения получения ошибочных результатов.

Индикатор качества услуги рассчитывается по формуле

$$Q = P - E, \quad (1)$$

где Q – (quality) индикатор качества; P – (perception) восприятие; E – (expectation) ожидание.

Положительное значение индикатора Q может быть получено в случае, если восприятие потребителя будет выше, чем ожидания. Индикатор качества Q , равный нулю, позволяет сформировать положительные результаты оценки (ожидания потребителя равны восприятию, полученному в ходе оказания услуг), отрицательное значение индикатора, при котором ожидание потребителя превосходит восприятие, выявляет какие аспекты в отношении услуг являются неудовлетворительными для потребителя и требуют необходимых улучшений.

В ходе исследования возможности применения метода «SERVQUAL» было проведено анкетирование потребителей услуг в области ОЕИ.

Полученные результаты и их обсуждение

По результатам проведения анкетирования потребителей, анализа и обработки полученных данных определены значения индикаторов качества для каждого из показателей.

Результаты обработки данных, полученных по результатам проведения анкетирования потребителей, приведены в табл. 3.

Результаты сравнения данных об ожидании и восприятии оказания услуг приведены на рис. 1.

Полученные данные по оценке качества услуг позволяют сделать вывод, что ожидаемый результат оказания услуг является достаточно высоким, среднее значение показателей 4,64 балла. Наибольшие ожидания потребители выражают по таким показателям, как «Надежность» и «Отзывчивость» по 4,8 балла, наименьшие ожидания по показателю «Материальность» 4,4 балла. Восприятие потребителей услуг также превышает среднее значение. Наибольшее значение восприятия было продемонстрировано по показателю «Уверенность», которое составило 4,7 балла, наименьшее составило 4,4 балла по показателю «Материальность».

Индекс качества по таким показателям, как «Материальность» и «Уверенность», является положительным значением, что означает, что восприятие оказания услуг превысило ожидания потребителей. Наибольший разрыв между восприятием и ожиданием можно наблюдать по показателю «Надежность», которое составило минус 0,13, однако данное значение близко к нулю, что означает, что индекс качества является удовлетворительным.

Совокупное значение индекса качества составило минус 0,01, что позволяет сделать вывод о высокой удовлетворенности потребителей. Таким образом, оказанные услуги в области ОЕИ соответствуют их ожиданиям.

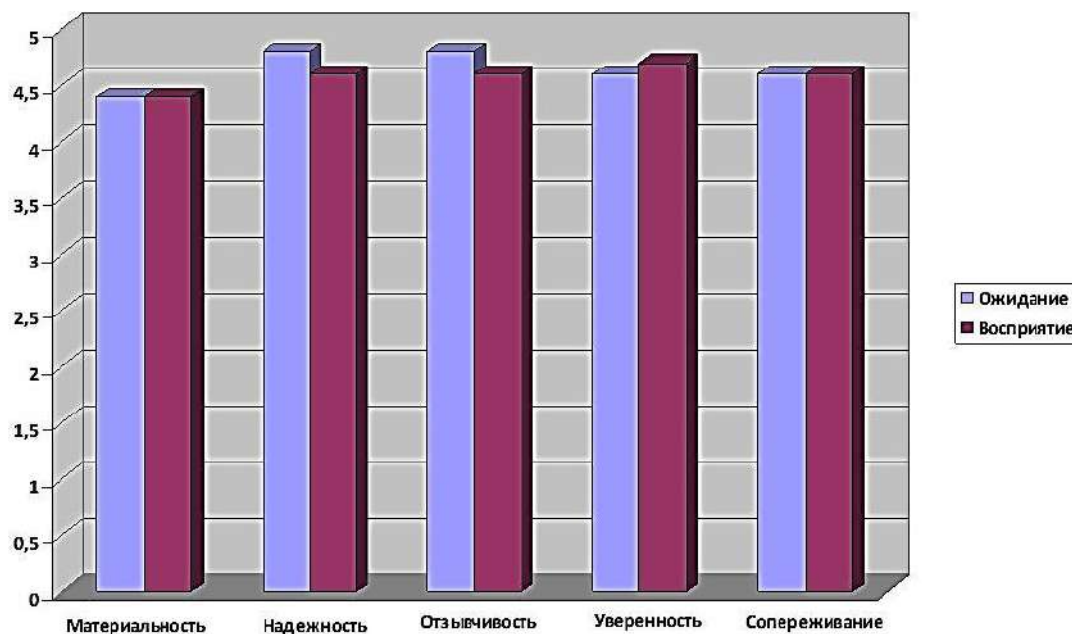


Рис. 1. График сравнения полученных данных об ожидании и восприятии качества оказания услуг
Fig. 1. Comparison between expectation and perception of the service quality

Таблица 3. Результаты обработки данных по анкетированию потребителей
 Table 3. Results of processing data on consumer surveys

Тип, № п/п	Частные показатели качества услуг в области ОЕИ	Ожидание	Восприятие	Индикатор качества	Среднее значение		
					Ожидание	Восприятие	Индикатор качества
М.1	Удобное расположение организации	4,1	4,4	0,3	4,4	4,4	0,03
М.2	Наличие необходимого оборудования	4,8	4,8	0,0			
М.3	Внешний вид сайта и информационных материалов	4,2	4,0	-0,2			
М.4	Внешний вид документов, выдаваемых по результатам оказания услуг	4,4	4,4	0,0			
Н.5	Оказание услуг в назначенный срок	4,7	4,4	-0,3	4,8	4,6	-0,12
Н.6	Надежная репутация организации	4,7	4,8	0,1			
Н.7	Отсутствие ошибок и неточностей в работе	4,9	4,7	-0,2			
Н.8	Высокая компетентность персонала	4,9	4,7	-0,2			
Н.9	Быстрое получение обратной связи	4,6	4,6	0,0			
О.10	Персонал проявляет отзывчивость при согласовании сроков оказания услуг	4,9	4,7	-0,2	4,8	4,6	-0,03
О.11	Персонал организации всегда помогает с решением вопросов и проблем	4,9	4,7	-0,2			
О.12	Персонал реагирует на просьбы заказчиков	4,8	4,9	0,1			
О.13	Между клиентами и персоналом организации существует атмосфера доверия и взаимопонимания	4,6	4,8	0,2			
У.14	Персонал предоставляет все необходимые разъяснения и консультации по вопросам предоставления услуг	4,7	4,6	-0,1	4,6	4,7	0,13
У.15	Персонал вежлив по отношению к заказчикам	4,4	4,8	0,4			
У.16	К заказчикам проявляется индивидуальный подход	4,4	4,6	0,2			
У.17	Доверие к результатам оказываемых услуг	4,9	4,9	0,0			
С.18	Персонал организации проявляет личное участие в решении вопросов заказчика	4,8	4,7	-0,1	4,6	4,6	-0,02
С.19	Персонал знает потребности заказчика	4,7	4,7	0,0			
С.20	Персонал клиентоориентирован	4,4	4,4	0,0			
С.21	Индивидуальное внимание каждому заказчику и высокий уровень обслуживания	4,7	4,4	-0,3			
С.22	Удобное время работы	4,3	4,6	0,3			

Для оценки возможности применения метода «SERVQUAL» был проведен SWOT-анализ. Результаты анализа приведены в табл. 4.

Таблица 4. SWOT-анализ применения метода «SERVQUAL»

Table 4. SWOT analysis of the SERVQUAL method

Сильные стороны	Слабые стороны
<ul style="list-style-type: none"> – Позволяет выявить ожидания потребителей – Позволяет количественно оценить удовлетворенность потребителей – При оценке рассматриваются различные показатели 	<ul style="list-style-type: none"> – Длительность сбора информации – Большое количество вопросов – Низкая заинтересованность в прохождении анкетирования – Ненадежность полученных данных – Не предусмотрена возможность сбора пожеланий или рекомендаций – Не позволяет оценить качество услуг в полном объеме
Возможности	Угрозы
<ul style="list-style-type: none"> – Получение информации для разработки мероприятий по улучшению качества услуг – Повышение количества оказываемых услуг – Привлечение новых потребителей – Повышение конкурентного преимущества 	<ul style="list-style-type: none"> – Получение некорректных, ложноположительных или ложноотрицательных данных

Заключение

Проведена апробация метода «SERVQUAL» при оценке качества услуг в области ОЕИ, в ходе которой:

- разработана анкета в соответствии с методом «SERVQUAL»;
- проведено анкетирование потребителей услуг;
- получены значения индекса качества услуг;
- проведена интерпретация полученных результатов.

Для определения возможности применения метода «SERVQUAL» проведен SWOT-анализ, который показал, что данный метод может быть использован для оценки удовлетворенности потребителей, при этом необходимо внимательно подойти к составлению анкеты. Однако при применении данного метода для оценки услуг в области ОЕИ выявлен ряд недостатков, для решения которых необходимо применение комплексных методов оценки качества услуг.

Список источников

1. Федеральный закон от 26.06.2008 № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_77904/.
2. ГОСТ Р ИСО 9000-2015. Системы менеджмента

качества. Основные положения и словарь. М.: Стандартинформ, 2019. 53 с.

3. ГОСТ Р 50646-2012. Услуги населению. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2020. 7 с.
4. Федеральный закон от 28 декабря 2013 г. № 412-ФЗ «Об аккредитации в национальной системе аккредитации» [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_156522/.
5. Приказ Министерства экономического развития РФ от 26 октября 2020 г. № 707 «Об утверждении критериев аккредитации и перечня документов, подтверждающих соответствие заявителя, аккредитованного лица критериям аккредитации» / Зарегистрировано в Минюсте РФ 16 ноября 2020 г., Рег. № 60907.
6. Приказ Министерства промышленности и торговли Российской Федерации от 31.07.2020 № 2510 «Об утверждении порядка проведения поверки средств измерений, требований к знаку поверки и содержанию свидетельства о поверке» / Зарегистрировано в Минюсте РФ 20 ноября 2020 г., Рег. № 61033.
7. ГОСТ ISO/IEC 17025-2019. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. М.: Стандартинформ, 2019. 32 с.
8. Салганова Е.И. Независимая оценка качества предоставления услуг организациями социального обслуживания Челябинской области // Материалы XXII Международной конференции памяти профессора Л.Н. Когана. Екатеринбург, 2019. С. 1741-1753.
9. Черненко А.Ф., Масленников П.П. Уровень сервиса как показатель конкурентоспособности в сфере международных автотранспортных перевозок // Современные проблемы науки и образования. 2013. №3. С 1-9.
10. Мусабинова Л.А. Анализ методов оценки качества услуг // World of science: сборник статей II Международной научно-практической конференции. Пенза: Наука и Просвещение, 2023. С. 95-97.

References

1. Federal Law No. 102-FZ dated June 26, 2008 "On ensuring uniformity of measurements". Available at: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_77904/ (Accessed on May 20, 2023).
2. State Standard GOST R ISO 9000-2015. *Sistemy menedzhmenta kachestva. Osnovnye polozheniya i slovar* [Quality Management Systems. Fundamentals and vocabulary]. Moscow: Standardinform, 2019, 53 p. (In Russ.)
3. State Standard GOST R 50646-2012. *Uslugi naseleniyu. Terminy i opredeleniya* [Services for people. Terms and definitions]. Moscow: Standardinform, 2020, 7 p. (In Russ.)
4. Federal Law No. 412-FZ dated December 28, 2013 "On accreditation in the national accreditation system". Available at: https://www.consultant.ru/document/cons_

- doc_LAW_156522/ (Accessed on May 20, 2023).
5. Order of the Ministry of Economic Development of the Russian Federation No. 707 dated October 26, 2020 "On approval of the accreditation criteria and the list of documents confirming the compliance of the applicant, an accredited person, with the accreditation criteria". Registered by the Ministry of Justice of the Russian Federation on November 16, 2020, registration No. 60907.
 6. Order of the Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation No. 2510 dated July 31, 2020 "On approval of the procedure for verification of measuring instruments, requirements for verification marks and the content of the verification certificate". Registered by the Ministry of Justice of the Russian Federation on November 20, 2020, registration No. 61033.
 7. State standard GOST ISO/IEC 17025-2019. *Obshchie trebovaniya k kompetentnosti ispytatelnykh i kalibrovочnykh laboratoriy* [General requirements for the competence of testing and calibration laboratories]. Moscow: Standardinform, 2019, 32 p. (In Russ.)
 8. Salganova E.I. An independent evaluation of the quality of services rendered by the social service organizations of the Chelyabinsk Region. *Materialy XXII Mezhdunarodnoy konferentsii pamyati professora L.N. Kogana* [Proceedings of the 22nd International Conference in memory of Professor L.N. Kogan]. Yekaterinburg, 2019, pp. 1741-1753. (In Russ.)
 9. Chernenko A.F., Maslennikov P.P. A level of service as an indicator of competitiveness in an international freight sector. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern Problems of Science and Education]. 2013;(3):1-9. (In Russ.)
 10. Musabirova L.A. Analysis of methods used for assessing the quality of services. *World of science: sbornik statei II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [World of Science: Proceedings of papers of the 2nd International Scientific and Practical Conference]. Penza: Nauka i Prosveshchenie, 2023, pp. 95-97. (In Russ.)

Поступила 11.09.2023; принята к публикации 13.10.2023; опубликована 25.12.2023
Submitted 11/09/2023; revised 13/10/2023; published 25/12/2023

Мусабилова Ляйсан Альбертовна – аспирант,

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, Казань, Россия; заместитель начальника ОСМК, ВНИИР – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», Казань, Россия. Email: musabirova.la@mail.ru. ORCID 0009-0006-0738-8601

Галимов Фарид Мисбахович – доктор технических наук, профессор,

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, Казань, Россия. Email: far-galim@yandex.ru.

Lyaisan A. Musabirova – postgraduate student,

Tupolev Kazan National Research Technical University – KAI, Kazan, Russia;
Deputy Head of the QMS Department of All-Russian Research Institute for Flow Metering – Branch of Mendelev All-Russian Research Institute for Metrology, Kazan, Russia.
Email: musabirova.la@mail.ru. ORCID 0009-0006-0738-8601

Farid M. Galimov – DrSc (Eng.), Professor,

Tupolev Kazan National Research Technical University – KAI, Kazan, Russia.
Email: far-galim@yandex.ru.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

MODELLING OF METALLURGICAL PROCESSES

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

УДК 691.7

DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-4-132-139



МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗГИБА СТАЛЕАЛЮМИНИЕВОГО КОМПОЗИТА С ВОЛНООБРАЗНОЙ ГРАНИЦЕЙ РАЗДЕЛА

Пивоварова К.Г.¹, Матвеев С.В.², Песина С.А.¹,
Могильных А.Е.¹, Пустовойтова О.В.¹, Федосеев С.А.³

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

² Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

³ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). В настоящее время усиливается тенденция замены традиционных конструкционных материалов на композиционные. Высокие удельные механические свойства композитов позволяют проектировать легкие и надежные конструкции. Перспективным научным направлением является разработка композиционных материалов, повышающих механические характеристики за счет совершенствования внешней структуры и технологии изготовления. Технология изготовления композитов Al-Steel с волнообразными контактными поверхностями между алюминием и сталью позволяет обеспечить повышенную прочность соединения слоев. Для проектирования конструкций из композиционных материалов широкое распространение получили интегрированные пакеты конечно-элементных расчетов, позволяющие моделировать влияние различных нагрузок, геометрических размеров и материалов элементов в каждом слое на жесткость композитов. **Цель работы.** Целью работы является исследование влияния волнового профиля на деформирование слоистого композиционного образца. **Используемые методы.** С использованием программного комплекса SIMULIA/Abaqus получены кривые прогиба, а также распределения деформации и напряжений вдоль оси Z деформированной сетки по длине образца композита при различных схемах деформирования. **Новизна.** Впервые проведено моделирование процесса изгиба слоистого композита АМг3-08сп с плоской и волнообразной границами раздела. **Результат.** Установлено, что создание волнообразной границы раздела сталеалюминиевого композита позволяет обеспечить повышение жесткости изделия. На основании расчетных данных о распределении деформации и напряжений Мизеса в различных слоях композита показано, что причиной снижения величины деформации в композите с волнообразной границей раздела является перераспределение напряжений. **Практическая значимость.** Результаты исследования позволяют проектировать композиционные материалы с повышенной жесткостью.

Ключевые слова: слоистые композиты, изгиб, деформация, моделирование, метод конечных элементов, жесткость, прочность, сталь, алюминий, напряжения Мизеса, волновой профиль

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-20073, <https://rscf.ru/project/22-19-20073/>, и финансовой поддержки Челябинской области.

© Пивоварова К.Г., Матвеев С.В., Песина С.А., Могильных А.Е., Пустовойтова О.В., Федосеев С.А., 2023

Для цитирования

Моделирование процесса изгиба сталеалюминиевого композита с волнообразной границей раздела / Пивоварова К.Г., Матвеев С.В., Песина С.А., Могильных А.Е., Пустовойтова О.В., Федосеев С.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №4. С. 132-139. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-132-139>



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

SIMULATION OF THE BENDING PROCESS OF A STEEL-ALUMINUM COMPOSITE WITH A WAVE-SHAPED INTERFACE

Pivovarova K.G.¹, Matveev S.V.², Pesina S.A.¹, Mogilnykh A.E.¹, Pustovoytova O.V.¹, Fedoseev S.A.³

¹ Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

² Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

³ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). Currently, there is a growing trend to replace traditional structural materials with composite ones. High specific mechanical properties of composites contribute to designing lightweight and reliable structures. A promising scientific area is the development of composite materials that increase mechanical characteristics by improving the external structure and manufacturing technology. The manufacturing technology of Al-steel composites with wavy contact surfaces between aluminum and steel provides increased strength of the connection between the layers. To design structures from composite materials, integrated packages of finite element calculations are widely used to simulate the effect of various loads, geometric dimensions and materials of elements in each layer on stiffness of composites. **Objectives.** The research is aimed at studying the influence of the wave profile on the deformation of a layered composite sample. **Methods Applied.** Using the SIMULIA/Abaqus software suite, the authors obtained deflection curves, as well as strain and stress distributions along the Z-axis of the deformed mesh along the length of the composite sample for various deformation schemes. **Originality.** The authors carried out a novel simulation of the process of bending of layered composite AMg3-08sp with flat and wavy interfaces. **Result.** It has been established that a wavy interface of the steel-aluminum composite increased stiffness of the product. Based on the calculated data on the distribution of deformation and von Mises stresses in different layers of the composite, it has been shown that the reason for the decreased deformation in the composite with a wavy interface is the redistribution of stresses. **Practical Relevance.** The results of the study contribute to designing composite materials with increased stiffness.

Keywords: layered composites, bending, deformation, simulation, finite element method, stiffness, strength, steel, aluminum, von Mises stresses, wave profile

The study was funded by the Russian Science Foundation, grant No.22-19-20073, <https://rscf.ru/project/22-1920073/>, and the Chelyabinsk Region.

For citation

Pivovarova K.G., Matveev S.V., Pesina S.A., Mogilnykh A.E., Pustovoytova O.V., Fedoseev S.A. Simulation of the Bending Process of a Steel-Aluminum Composite with a Wave-Shaped Interface. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 4, pp. 132-139. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-132-139>

Введение

Элементы конструкций в виде пластин и оболочек широко используются в автомобилестроении, судостроении, авиационной и космической промышленности, химическом машиностроении [1]. В последние годы усиливается тенденция замены традиционных конструкционных материалов, которые ранее применялись для изготовления этих элементов, на композиционные. Этому способствуют высокие удельные механические свойства композитов, что позволяет проектировать легкие и надежные конструкции.

Перспективным научным направлением является разработка композиционных материалов, повышающих механические характеристики за счет совершенствования внешней структуры и технологии изготовления [2-5]. В работах [6-8] предложена технология холодной прокатки для изготовления слоистых композитов Al-Steel с улучшенной прочностью сцепле-

ния между слоями за счет механического заклинивания и повышенной пластической деформации на границе раздела. Повышенная прочность соединения слоистых композитов обеспечивается за счет создания волнообразных контактных поверхностей между алюминием и сталью с взаимным проникновением твердого материала в мягкий. Проанализировано влияние синусоидального профиля рабочего вала на поведение композиционных слоев. Показано, что создание волнообразной границы раздела между Al и Fe в сочетании с активизацией сдвиговых и ротационных мод пластического течения металлов, инициирующих интенсивную пластическую деформацию, может обеспечить повышенную прочность соединения сталеалюминиевых слоистых композитов при холодной пластической сварке. Однако при моделировании не было исследовано влияние волнового профиля на деформирование слоистого композиционного образца.

В последнее время широкое распространение получили интегрированные пакеты конечно-элементных расчетов, которые позволяют проводить все виды проектных расчетов, в том числе конструкций из композиционных материалов [9-12]. В этих программах заложена возможность моделирования влияния различных нагрузок, геометрических размеров и материалов элементов в каждом слое на жесткость и прочность композитов. В работе [13] приведены результаты моделирования методом конечных элементов деформирования при растяжении титано-алюминиевого композита Д20-АД1-ВТ6С с постоянной относительной толщиной мягкой прослойки АД1 и с варьированием параметров волнового профиля сварного соединения. Показано, что рост отношения амплитуды к шагу волны до 0,5 приводит к росту на 4-5% усилия, необходимого для сопоставимого растяжения, по сравнению с образцом с плоской границей, и преимущественной локализации пластической деформации вблизи свободных поверхностей.

Целью настоящей работы являлось моделирование методом конечных элементов влияния формы профиля границы раздела двухслойных композитов Al-Steel на деформирование изделия в процессе изгиба. Эксплуатация под нагрузкой деталей и узлов из сталелюминиевых материалов сопровождается возникновением упругих и пластических деформаций. Требования жесткости и прочности необходимо учитывать при расчете и проектировании конструктивных деталей и узлов [14].

Материалы и методы исследования

Для моделирования поведения двухслойного композита АМг3-08сп при изгибе использовали программный комплекс SIMULIA/Abaqus, позволяющий

получать распределение эквивалентных напряжений Мизеса и составляющих пластической деформации в зависимости от условий нагружения.

Моделирование проводилось для двух типов слоистых композитов: с плоской и волнообразной границей раздела (рис. 1). Амплитуда симметричной синусоидальной волны составляла $A = 0,125$ мм, период $T = 2$ мм. Размер стороны тетраэдральной ячейки конечно-элементной сетки выбирался равным 0,1 мм. Выбор размеров элементов определялся сходимостью результатов с погрешностью не более 3%. Прочность связей между слоями биметалла соответствовала условию «Тie», при котором прочность связи соответствует характеристикам наименее прочного элемента пары. В качестве материалов для композита были выбраны алюминиевый сплав АМг3 и сталь 08сп. Толщины верхнего (АМг3) и нижнего (08сп) слоев принимались одинаковыми и равными 0,5 мм. Размеры исследуемых образцов составляли 200×300 мм.

Рассматривали два типа образцов с волнообразной границей раздела: вырезанные вдоль и перпендикулярно направлению прокатки (рис. 2). Для расчета упрочнения материалов в результате пластического деформирования использовали для АМг3 и 08сп известные кривые упрочнения [15], согласно которым предел текучести можно определить по формулам:

$$- \text{АМг3: } \sigma_{0,2} = 74 + 63\varepsilon^{0,3}; \quad (1)$$

$$- \text{08сп: } \sigma_{0,2} = 297 + 76\varepsilon^{0,48}. \quad (2)$$

Согласно граничным условиям, узкие боковые грани образцов жестко фиксировались в пространстве (рис. 3). К центру образца прикладывалась сосредоточенная сила, равная 200 Н, направленная перпендикулярно его плоскости.

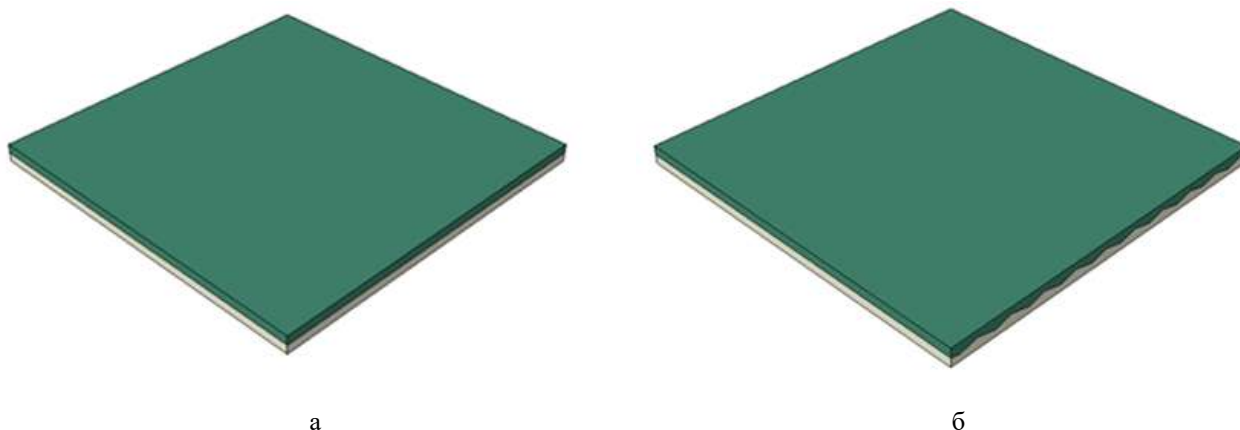


Рис. 1. Слоистые композиты с плоской (а) и волнообразной (б) границами раздела

Fig. 1. Layered composites with flat (a) and wavy (b) interfaces

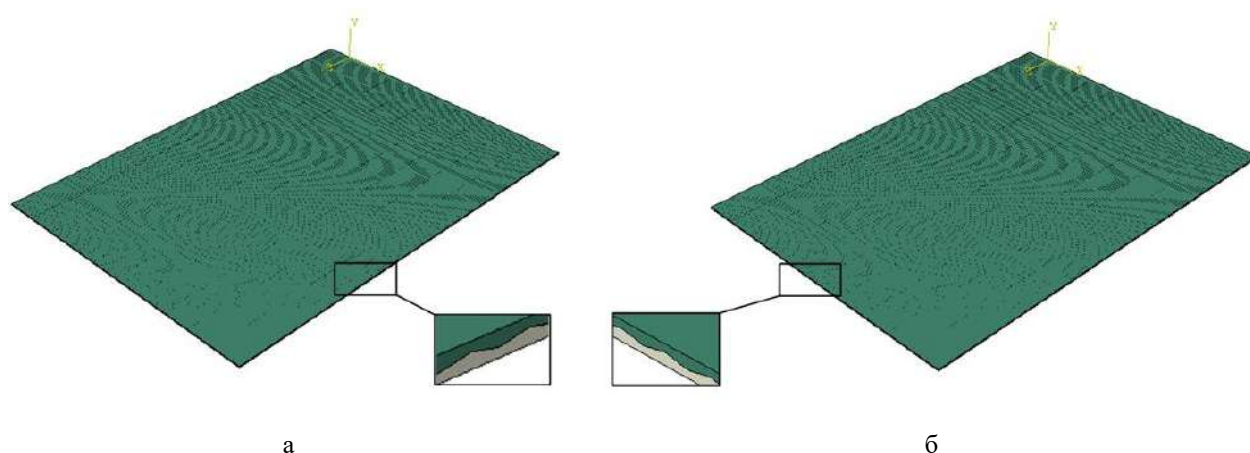


Рис. 2. Образцы слоистых композитов с волнообразной границей раздела, вырезанные вдоль (а) и перпендикулярно (б) направлению прокатки
 Fig. 2. Samples of layered composites with a wavy interface, cut along (a) and perpendicular (b) to the direction of rolling

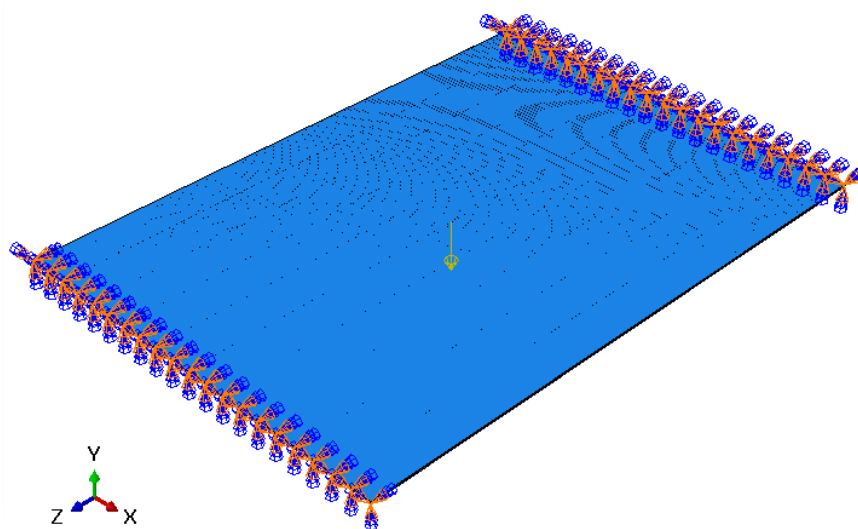


Рис. 3. Схема нагружения образца и граничные условия
 Fig. 3. Sample loading scheme and boundary conditions

Полученные результаты и их обсуждение

С использованием программного комплекса SIMULIA/Abaqus получены кривые прогиба, а также распределения деформации и напряжений вдоль оси Z деформированной сетки по длине образца композита при трех схемах деформирования:

- 1 схема: изгиб образца композита с плоской границей раздела;
- 2 схема: изгиб образца композита с волнообразной границей раздела перпендикулярно линии прокатки;
- 3 схема: изгиб образца композита с волнообразной границей раздела вдоль линии прокатки.

На рис. 4 приведены кривые прогиба в среднем сечении образцов. Для образца, вырезанного перпендикулярно направлению прокатки, среднее сечение соответствовало соотношению слоев биметалла 1:1. Сравнение графиков свидетельствует, что наибольшее максимальное значение прогиба имеет образец с плоской границей раздела (50 мм). Композиты с волнообразной границей раздела имеют меньшие значения прогиба: 20 мм – для образца с границей перпендикулярно линии прокатки и 13 мм – для образца с границей вдоль линии прокатки. Причиной снижения величин деформации в композите с волнообразной границей раздела может являться перераспределение напряжений в волновом профиле.

Этот вывод подтверждается сравнением полученных расчетных кривых распределения пластической деформации (рис. 5) и напряжений Мизеса (рис. 6) по длине образца при различных схемах нагружения.

Этот вывод подтверждается сравнением полученных расчетных кривых распределения пластической деформации (рис. 5) и напряжений Мизеса (рис. 6) по длине образца при различных схемах нагружения.

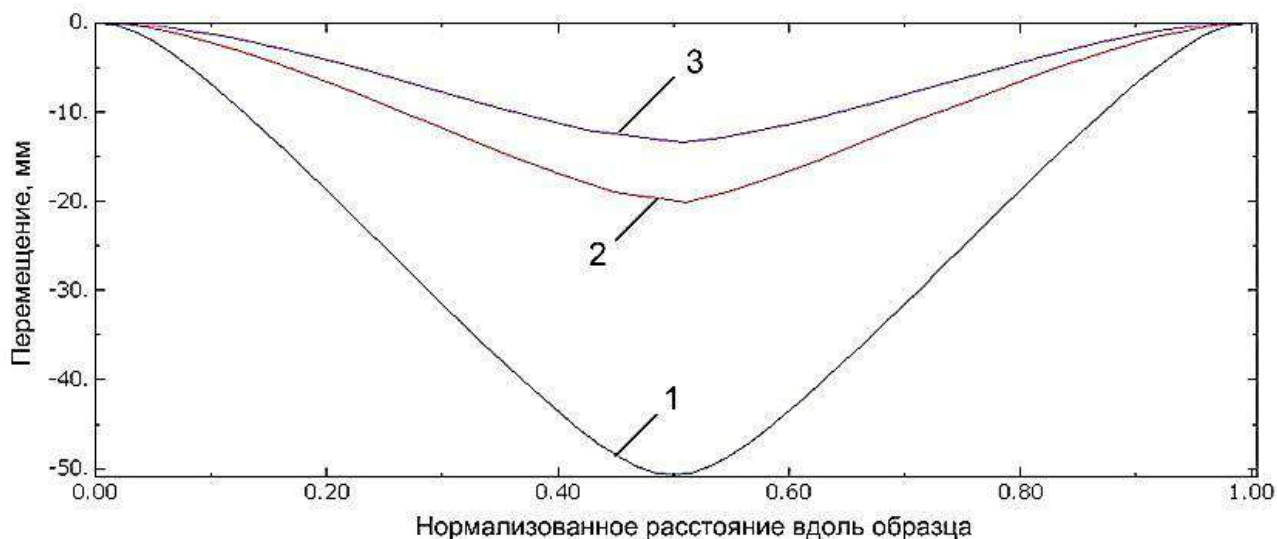


Рис. 4. Кривые прогиба по длине образцов: 1 – композит с плоской границей раздела; 2 – композит с волнообразной границей раздела перпендикулярно линии прокатки; 3 – композит с волнообразной границей раздела вдоль линии прокатки

Fig. 4. Deflection curves along the length of the samples: 1 is a composite with a flat interface, 2 is a composite with a wavy interface perpendicular to the rolling line, 3 is a composite with a wavy interface along the rolling line

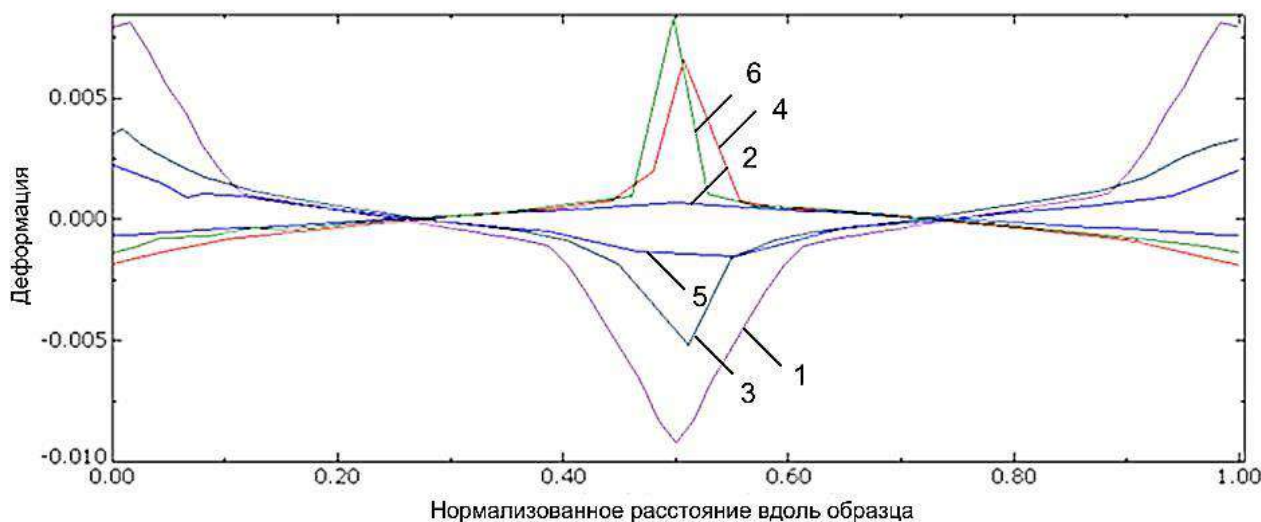


Рис. 5. Распределение деформаций по длине образца композита: 1 – с плоской границей раздела, верхний слой образца (AMg3); 2 – с плоской границей раздела, нижний слой образца (08сп); 3 – с волнообразной границей раздела перпендикулярно линии прокатки, верхний слой образца (AMg3); 4 – с волнообразной границей раздела перпендикулярно линии прокатки, нижний слой образца (08сп); 5 – с волнообразной границей раздела вдоль линии прокатки, верхний слой образца (AMg3); 6 – с волнообразной границей раздела вдоль линии прокатки, нижний слой образца (08сп)

Fig. 5. Strain distribution along the length of the composite sample: 1 is with a flat interface, a top layer of the sample (AMg3), 2 is with a flat interface, a bottom layer of the sample (08sp), 3 is with a wavy interface perpendicular to the rolling line, a top layer of the sample (AMg3), 4 is with a wavy interface perpendicular to the rolling line, a bottom layer of the sample (08sp), 5 is with a wavy interface along the rolling line, a top layer of the sample (AMg3), 6 is with a wavy interface along the rolling line, a bottom layer of the sample (08sp)

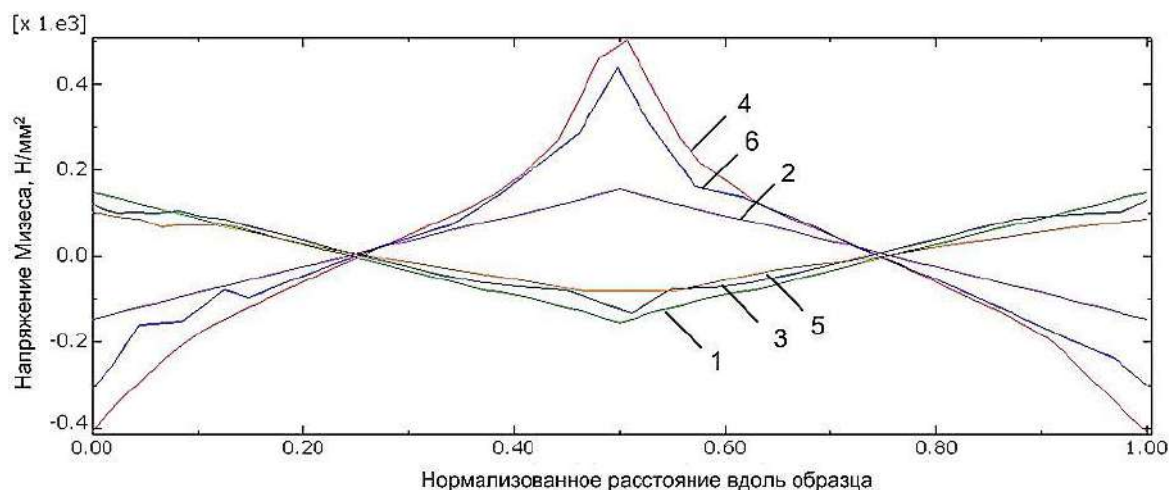


Рис. 6. Распределение напряжений Мизеса по длине образца композита: 1 – с плоской границей раздела, верхний слой образца (АМг3); 2 – с плоской границей раздела, нижний слой образца (08сп); 3 – с волнообразной границей раздела перпендикулярно линии прокатки, верхний слой образца (АМг3); 4 – с волнообразной границей раздела перпендикулярно линии прокатки, нижний слой образца (08сп); 5 – с волнообразной границей раздела вдоль линии прокатки, верхний слой образца (АМг3); 6 – с волнообразной границей раздела вдоль линии прокатки, нижний слой образца (08сп)

Fig. 6. Von Mises stress distribution along the length of the composite sample: 1 is with a flat interface, a top layer of the sample (АМг3), 2 is with a flat interface, a bottom layer of the sample (08сп), 3 is with a wavy interface perpendicular to the rolling line, a top layer of the sample (АМг3), 4 is with a wavy interface perpendicular to the rolling line, a bottom layer of the sample (08сп), 5 is with a wavy interface along the rolling line, a top layer of the sample (АМг3), 6 is with a wavy interface along the rolling line, a bottom layer of the sample (08сп)

Установлено, что при изгибе образца с плоской границей раздела (см. **рис. 5**, кривые 1, 2) пластическая деформация локализуется в верхнем слое образца (АМг3) в центральной зоне в пределах 0,4-0,6 относительного расстояния от конца образца, а также по краям образца. Ее максимальное значение составляет 0,01. В нижнем слое образца (08сп) присутствует только незначительная упругая деформация.

При изгибе образца с волнообразной границей раздела перпендикулярно линии прокатки (см. **рис. 5**, кривые 3, 4) максимальная деформация в стальном слое превышает деформацию в слое алюминия и достигает значения 0,006. При этом наблюдается снижение на 50% максимального значения деформации в верхнем слое образца (АМг3), которое составляет 0,005. Зоны локальной пластической деформации присутствуют на обоих графиках.

При изгибе образца с волнообразной границей раздела вдоль линии прокатки (см. **рис. 5**, кривые 5, 6) значения максимальной деформации в стальном слое достигают 0,008. Значение деформации в слое алюминия в центре образца составляет 0,0015, что на 85% меньше аналогичного значения для образца с плоской границей раздела. Зона локальной пластической деформации наблюдается только на графике для 08сп.

Установлено, что при изгибе образца с плоской границей раздела (см. **рис. 6**, кривые 1, 2) напряжения Мизеса в верхнем и нижнем слоях симметричны друг относительно друга и равны по амплитуде. Распреде-

ление напряжений имеет V-образный характер с максимальными значениями, равными 150 Н/мм².

При изгибе образцов с волнообразной границей раздела (см. **рис. 6**, кривые 3-6) максимальные напряжения Мизеса в центре образца в стальном слое имеют большие значения (400-500 Н/мм²) по сравнению с напряжениями в слое алюминия (80-100 Н/мм²).

Таким образом, создание волнообразной границы раздела сталеалюминиевого композита позволяет обеспечить повышение жесткости изделия, поскольку при одинаковом значении прилагаемого усилия величина деформации у образцов с волнообразной границей соединения меньше, чем у образца с плоской границей соединения.

Заключение

1. С помощью программного комплекса SIMULIA/Abaqus изучены процессы деформации изгиба сталеалюминиевого композита АМг3-08сп с волнообразной и плоской границей раздела при различных условиях нагружения.

2. Получено распределение прогиба по длине образца композита. Установлено, что создание волнообразной границы раздела сталеалюминиевого композита позволяет обеспечить снижение величины прогиба образца на 60-74%.

3. Рассчитано изменение деформации и напряжений Мизеса в различных слоях композита при варьировании условий изгиба. Показано, что причиной снижения величины деформации в композите с вол-

нообразной границей раздела является перераспределение напряжений в волновом профиле.

Список источников

1. Нестеров В.А., Суханов А.С. Моделирование композитного ферменного стержня базового модуля разгонного блока // *Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: материалы XXI Международного симпозиума им. А.Г. Горшкова*. М.: ООО «ТРП», 2015. С. 148-149.
2. Волков-Богородский Д.Б., Власов А.Н. Моделирование гиперупругих композитов с малыми добавками дисперсных наполнителей. Масштабные эффекты в нанокompозитах. URL: https://tesis.com.ru/infocenter/downloads/abaqus/abaqus_es15_7.pdf
3. Задачи моделирования и оптимизации панелей переменной жесткости и конструкций из слоистых композитов / А.И. Боровков, Д.В. Мамчиц, А.С. Немов, А.Д. Новокшенов // *Известия Российской академии наук. Механика твердого тела*. 2018. №1. С. 113-122.
4. Development of an ABAQUS™ plug-in for predicting composite plates stiffness with in-plane periodicity / Wu D.J., Mei Z., Zhu Y., Hu H. // *SoftwareX*. 2023, vol. 21, no. 6, 101281. DOI: 10.1016/j.softx.2022.101281
5. Применение самозаклинивающихся структур: демонстрация концепции на основе КЭ-моделирования / Д.В. Константинов, С.В. Матвеев, А.М. Песин, А.Г. Корчунов, К.Г. Пивоварова // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2023. Т. 21. №1. С. 93-99. DOI: 10.18503/19952732-2023-21-1-93-99
6. FEM simulation of fabrication of Al-steel layered composites with mechanical bonding through the interfacial concavo-convex lock effect / Pesin A., Pustovoitov D., Biryukova O., Ilyina N. // *Procedia Manufacturing*. 2020, vol. 50, no. 1, pp. 579-583. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.08.104
7. Асимметричная прокатка листов и лент: история и перспективы развития / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, О.Д. Бирюкова, А.Е. Кожемякина // *Вестник Южно-Уральского государственного университета*. Серия: *Металлургия*. 2020. Т. 20. №3. С. 81-96.
8. Особенности процесса аккумулирующей прокатки многослойных металлических материалов / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, К.Г. Пивоварова, П. Тандон, А.Е. Кожемякина // *Теория и технология металлургического производства*. 2020. №3(34). С. 31-36.
9. Assessment of layerwise user-elements in Abaqus for static and free vibration analysis of variable stiffness composite laminates / Moreira J.A., Moleiro F., Araújo A.L., Pagani A. // *Composite Structures*. 2023, vol. 303, 116291. DOI: 10.1016/j.compstruct.2022.116291
10. Cho H., Kim D.N. Controlling the stiffness of bistable kirigami surfaces via spatially varying hinges // *Materials & Design*. 2023, vol. 231, 112053. DOI: 10.1016/j.matdes.2023.112053
11. Ojo S.O., Zucco G., Weaver P.M. Efficient three-dimensional geometrically nonlinear analysis of variable stiffness composite beams using strong Unified

Formulation // *Thin-Walled Structures*. 2021, vol. 163, 107672. DOI: 10.1016/j.tws.2021.107672

12. Моделирование процессов деформирования слоистых титано-алюминиевых композитов в процессе изгиба / Л.М. Гуревич, Ю.П. Трыков, В.М. Волчков, О.С. Кисилев, В.Ф. Даненко, С.П. Писарев // *Известия ВолгГТУ*. 2012. №9. С. 11-15.
13. Гуревич Л.М., Даненко В.Ф., Писарев С.П. Влияние параметров волнового профиля границы соединения слоев титано-алюминиевого композита на поведение при растяжении // *Известия ВолгГТУ*. 2021. №4. С. 48-54. DOI: 10.35211/1990-5297-2021-4-251-48-54
14. Комаров В.А. Повышение жесткости конструкций топологическими средствами // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета)*. 2003. №1. С. 24-37.
15. Третьяков А.В., Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. М.: *Металлургия*, 1973. 224 с.

References

1. Nesterov V.A., Sukhanov A.S. Modeling of a composite truss core of the base module of the upper stage. *Dinamicheskie i tekhnologicheskie problemy mekhaniki konstruktssii i sploshnykh sred: materialy XXI Mezhdunarodnogo simpoziuma im. A.G. Gorshkova* [Dynamic and Technological Problems of Mechanics of Structures and Continuous Media: Proceedings of the 21st Gorshkov International Symposium]. Moscow: LLC TRP, 2015, pp. 148-149. (In Russ.)
2. Volkov-Bogorodsky D.B., Vlasov A.N. Modeling of hyperelastic composites with small additives of dispersed fillers. Large-scale effects in nanocomposites. Available at: https://tesis.com.ru/infocenter/downloads/abaqus/abaqus_es15_7.pdf
3. Borovkov A.I., Mamchits D.V., Nemov A.S., Novokshenov A.D. Tasks of modeling and optimization of variable stiffness panels and structures made of layered composites. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Mekhanika tverdogo tela* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Solid State Mechanics]. 2018;(1):113-122. (In Russ.)
4. Wu D.J., Mei Z., Zhu Y., Hu H. Development of an ABAQUS™ plug-in for predicting composite plates stiffness with in-plane periodicity. *SoftwareX*. 2023;21(6):Article ID 101281. DOI:10.1016/j.softx.2022.101281
5. Konstantinov D.V., Matveev S.V., Pesin A.M., Korchunov A.G., Pivovarov K.G. Application of interlocking structures: FEM-based concept demonstration. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023;21(1):93-99. (In Russ.) DOI:10.18503/1995-2732-2023-21-1-93-99
6. Pesin A., Pustovoitov D., Biryukova O., Ilyina N. FEM simulation of fabrication of Al-steel layered composites

- with mechanical bonding through the interfacial concavo-convex lock effect. *Procedia Manufacturing*. 2020;50(1):579-583. DOI:10.1016/j.promfg.2020.08.104
7. Pesin A.M., Pustovoitov D.O., Biryukova O.D., Kozhemyakina A.E. Asymmetric rolling of sheets and narrow strips: history and prospects of development. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Metallurgiya*. [Bulletin of South Ural State University. Series: Metallurgy]. 2020;20(3):81-96. (In Russ.)
 8. Pesin A.M., Pustovoitov D.O., Pivovarova K.G., Tandon P., Kozhemyakina A.E. Features of the process of accumulative roll bonding of multilayer metal materials. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva* [Theory and Technology of Metallurgical Production]. 2020;(3(34)):31-36. (In Russ.)
 9. Moreira J.A., Moleiro F., Araújo A.L., Pagani A. Assessment of layerwise user-elements in Abaqus for static and free vibration analysis of variable stiffness composite laminates. *Composite Structures*. 2023;303:Article ID 116291. DOI:10.1016/j.compstruct.2022.116291
 10. Cho H., Kim D.N. Controlling the stiffness of bistable kirigami surfaces via spatially varying hinges. *Materials & Design*. 2023;231:Article ID 112053. DOI:10.1016/j.matdes.2023.112053
 11. Ojo S.O., Zucco G., Weaver P.M. Efficient three-dimensional geometrically nonlinear analysis of variable stiffness composite beams using strong Unified Formulation. *Thin-Walled Structures*. 2021;163:Article ID 107672. DOI:10.1016/j.tws.2021.107672
 12. Gurevich L.M., Trykov Yu.P., Volchkov V.M., Kiselev O.S., Danchenko V.F., Pisarev S.P. Modeling of deformation processes of layered titanium-aluminum composites during bending. *Izvestiya VolgGTU* [Izvestia of Volgograd State Technical University]. 2012;(9):11-15. (In Russ.)
 13. Gurevich L.M., Danenko V.F., Pisarev S.P. Influence of the parameters of the wave profile of the joint boundary of titanium-aluminum composite layers on stress behavior. *Izvestiya VolgGTU* [Izvestia of Volgograd State Technical University]. 2021;(4):48-54. (In Russ.) DOI:10.35211/1990-5297-2021-4-251-48-54
 14. Komarov V.A. Increasing stiffness of structures by topological means. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S.P. Koroleva (natsionalnogo issledovatel'skogo universiteta)* [Bulletin of Korolev Samara State Aerospace University (National Research University)]. 2003;(1):24-37. (In Russ.)
 15. Tretyakov A.V., Zyuzin V.I. *Mekhanicheskie svoystva metallov i spлавov pri obrabotke davleniem* [Mechanical properties of metals and alloys during metal forming]. Moscow: Metallurgiya, 1973, 224 p. (In Russ.)

Поступила 29.08.2023; принята к публикации 10.10.2023; опубликована 25.12.2023
Submitted 29/08/2023; revised 10/10/2023; published 25/12/2023

Пивоварова Ксения Григорьевна – доктор технических наук, профессор,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: k.pivovarova@magtu.ru. ORCID 0000-0002-9961-4074

Матвеев Сергей Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор,
Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия.

Песина Светлана Андреевна – доктор филологических наук, профессор,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.

Могильных Анна Евгеньевна – кандидат технических наук, инженер,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.

Пустовойтова Ольга Васильевна – кандидат филологических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.

Федосеев Сергей Анатольевич – доктор технических наук, профессор,
Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия.

Kseniya G. Pivovarova – DrSc (Eng.), Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: k.pivovarova@magtu.ru. ORCID 0000-0002-9961-4074

Sergei V. Matveev – DrSc (Physics and Mathematics), Professor,
Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia.

Svetlana A. Pesina – DrSc (Philology), Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Anna E. Mogilnykh – PhD (Eng.), Engineer,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Olga V. Pustovoitova – PhD (Philology), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Sergei A. Fedoseev – DrSc (Eng.), Professor,
Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia.

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.774.35.016.2
DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-4-140-147



МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБКАТКИ ДЕФЕКТНЫХ КОНЦОВ ГОРЯЧЕДЕФОРМИРОВАННЫХ ТРУБ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ НА УСТАНОВКАХ С АВТОМАТИЧЕСКИМ СТАНОМ

Федулов А.А., Беляев С.Ю., Булганина М.Ю., Раскатов Е.Ю.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Для технологии получения горячедеформированных труб на трубопрокатных установках с раскаткой труб способом продольной прокатки на короткой оправке в диапазоне номинальных диаметров к толщине стенки $D/S = 25-35$ характерно появление продольных концевых дефектов. Попадание труб с данными дефектами после автоматического стана (или tandemного стана) в дальнейшие станы сопровождается ростом энергосиловых параметров процессов, а следовательно, ударными нагрузками на элементы клетей и привода станов. **Цель работы.** Оценка характера нагрузок, возникающих при разглаживании продольных концевых дефектов труб в обкатных машинах, посредством выполнения математического моделирования данного процесса, которое позволило определить нагрузки в течение процесса и получить окончательное формоизменение трубы после выхода из обкатной клетки в зависимости от режимов обкатки. **Используемые методы.** Для объемной постановки задачи по определению напряженно-деформированного состояния материала трубы в очаге деформации используется программный комплекс трехмерного моделирования DEFORM, основанный на применении метода конечных элементов для задач пластического течения. **Новизна.** Разработка математической модели процесса обкатки труб после автоматического стана способом поперечно-винтовой прокатки на конической оправке, которая учитывает геометрию дефектного заднего конца трубы, образованного при раскатке на предыдущей стадии и напряженно-деформированном состоянии заготовки перед обкаткой, а также позволяет варьировать режим обкатки, выполнять моделирование для различных материалов (в том числе сталей групп повышенной прочности). **Результат.** Впервые получены данные по нагрузкам на инструмент для всех стадий процесса – от задачи заготовки в рабочую клетку, при установившемся режиме, а также в момент выхода трубы с попаданием дефектного конца между валками и оправкой, что приводит к пиковому возрастанию нагрузок. **Практическая значимость.** Модель может быть использована для получения новых данных о процессе обкатки.

Ключевые слова: горячедеформированные трубы, трубопрокатная установка, обкатная машина, тонкостенные трубы, продольные дефекты

© Федулов А.А., Беляев С.Ю., Булганина М.Ю., Раскатов Е.Ю., 2023

Для цитирования

Моделирование процесса обкатки дефектных концов горячедеформированных труб при производстве на установках с автоматическим станом / Федулов А.А., Беляев С.Ю., Булганина М.Ю., Раскатов Е.Ю. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №4. С. 140-147. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-140-147>



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

SIMULATION OF A BURNISHING PROCESS FOR DEFECTIVE ENDS OF HOT-DEFORMED TUBES, WHEN PRODUCING THEM ON FACILITIES WITH AN AUTOMATIC ROLLING MILL

Fedulov A.A., Belyaev S.Yu., Bulganina M.Yu., Raskatov E.Yu.

Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The technology of producing hot-deformed tubes on tube rolling facilities with the rough tube elongation by longitudinal rolling on a short mandrel in the range of the nominal diameter/wall thickness ratio, $D/S = 25-35$, is characterized by containing longitudinal end defects. The transfer of tubes with these defects after the automatic mill (or the tandem mill) into the downstream mills is accompanied by an increase in the energy and power parameters of the processes, and, therefore, impact loads on the units of the stands and the drive of the mills. **Objectives.** The research is aimed at assessing loads that occur when flattening longitudinal end defects of tubes on burnishing mills using the mathematical simulation of the process to determine loads during the process and obtain the final forming shape for the tube after the burnishing stand depending on the process parameters. **Methods Applied.** For a 3D problem statement used to determine the stress and strain state of the tube material in the deformation zone, the DEFORM 3D modeling software suite is used based on the finite element method (FEM) for plastic flow problems. **Originality.** Development of a mathematical model of the tube burnishing process after an automatic rolling mill by helical rolling on a conical mandrel, factoring into geometry of the defective rear end of the tube formed during the elongation at the previous stage and the stress and strain state of the workpiece before burnishing, and varying the burnishing mode, perform simulation for various materials (including steels of higher strength groups). **Result.** The authors obtained novel data on the loads on the tool for all the process stages: from feeding the workpiece into an operating stand at the steady state, and to the exiting tube with the defective end between the rolls and the mandrel, leading to a peak increase in loads. **Practical Relevance.** The model can be used to obtain new data on the burnishing process.

Keywords: hot-deformed tubes, tube rolling facility, burnishing mill, thin-walled tubes, longitudinal defects

For citation

Fedulov A.A., Belyaev S.Yu., Bulganina M.Yu., Raskatov E.Yu. Simulation of a Burnishing Process for Defective Ends of Hot-Deformed Tubes, when Producing Them on Facilities with an Automatic Rolling Mill. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 4, pp. 140-147. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-140-147>

Введение

На сегодняшний день бесшовные трубы применяются практически во всех отраслях промышленности, например, в качестве нефтегазопроводных, для бурения и обсадки скважин, а также как основные элементы для котельных установок и силовых элементов машин и сооружений [1].

Производство труб является одним из наиболее сложных и ответственных этапов в общей технологической цепи выпуска металлопродукции, который должен совмещать в себе высокую производительность, большой объем производства и гарантированное качество готовых изделий, направляемых по дальнейшим этапам производственного цикла [2]. Специфика трубного передела заключается в многопереходной деформации заготовки, осуществляющейся последовательно в станах различных типов, каждый из которых характеризуется различными схемами напряженно-деформированного состояния (НДС) [3, 4].

Важное место среди трубопрокатных установок занимают установки с автоматическим раскатным станом (или двухклетьевым tandemным станом), поз-

воляющие совмещать универсальность и маневренность с потребительским уровнем выпускаемой продукции. В то же время черновые трубы, полученные на данном агрегате, характеризуются повышенной (по сравнению с другими освоенными способами) разностенностью и возможностью появления продольных рисков в местах контакта боковой поверхности труб с изношенными участками калибра.

С целью устранения этих дефектов трубопрокатные установки с автоматическим станом (tandemным станом) оборудуются двух- или трехвалковыми обкатными машинами поперечно-винтовой прокатки. Следует отметить, что рассчитанные на исправления данных дефектов обкатные машины не всегда способны устранить более крупные дефекты, выраженные в отклонении раскатанной гильзы от заданной геометрии, что, в свою очередь, может привести к перегрузке линии привода машины или поломке прокатного инструмента.

Постановка задачи и моделирование процесса

Один из примеров ярко выраженных дефектов, не предназначенных к дальнейшему исправлению, мож-

но наблюдать в исследовании [5]. В ходе работы обнаружен новый вид дефектов – продольные «плавники» переменной высоты на выходном конце черновой трубы после автоматического стана (рис. 1).

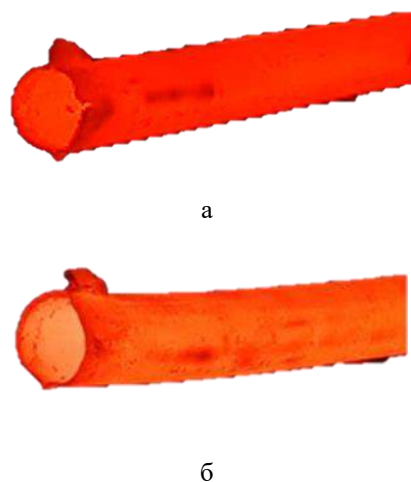


Рис. 1. Дефект прокатки: выпуски на задних концах трубы – продольные «плавники» переменной высоты: а – для трубы 219×7; б – для трубы 219×8

Fig. 1. Rolling defect: free length on rear ends of the tube – longitudinal “fin-shaped” defects of variable height: a is for tube 219×7; b is for tube 219×8

Появление данного дефекта после раскатки гильзы в автоматическом стане наиболее характерно для тонкостенных труб (с соотношением номинальных диаметра к толщине стенки $D/S = 25 \div 35$), что обосновывается стесненной деформацией при раскатке гильзы в автоматическом стане. В результате потери устойчивости заднего конца труб часть металла заготовки попадает в выпуски калибра прокатных валков автоматического стана и раскатывается между их ребрами [6].

При передаче в клетку обкатного и калибровочного стана труба обжимается по диаметру, и плавники, прижимаясь к боковой поверхности трубы, образуют складки, несплошности заднего конца, местные утолщения по периметру. Как показывают экспериментальные измерения [7], разглаживание данного дефекта в прокатных клетках сопровождается появлением пиковых нагрузок вплоть до выходных клеток калибровочного стана. Полученный конец не пригоден для дальнейшего использования и должен быть удален перед финишной обработкой труб.

Таким образом, в условиях интенсификации производства, необходимости снижения технологических отходов и повышения качества труб ключевой задачей является стабильность производства в каждой отдельной операции. Успешное ведение операции обкатки требует оценки особенностей протекания процесса поперечно-винтовой прокатки труб в обкатных машинах, в том числе при попадании в клетку обкатной ма-

шины труб с продольными концевыми дефектами, а также верхней границы значений параметров процесса при появлении пиковых нагрузок.

В связи с этим поставлена задача исследования обкатки горячедеформированных труб выбранного сортамента при помощи математической модели (на основе конечно-элементного анализа) с целью подбора настроечных параметров обкатного стана, что позволило бы предложить рациональные режимы ведения данного процесса.

Для выполнения математического моделирования предлагается разработка трехмерной модели процесса поперечно-винтовой прокатки труб в двухвалковой клетке на конической оправке на основе обкатной машины, установленной за автоматическим станом ТПА-220, в условиях, приближенных к реальным. Задание математической модели и ее аналитическое решение производится с помощью программного комплекса КЭ-моделирования, зарекомендовавшего себя на практике [8-12].

Расчетная схема процесса обкатки, представленная на рис. 2, включает трубную заготовку, обкатные валки, стабилизирующую оправку стана и направляющую проводку. Деформация осуществляется за счет обкатывания валками заготовки, помещенной на конической оправке. Так как заготовка при обкатке перемещается в трехмерном пространстве по винтовой траектории, а оси вращения обкатных валков наклонены к оси перемещения заготовки на угол подачи, геометрическую схему необходимо формулировать в объемной постановке. Окружная скорость валков задается $0,5 \text{ рад/с}$ при угле обкатки $7,5^\circ$, скольжение определяется продольной составляющей линейной скорости перемещения валков.

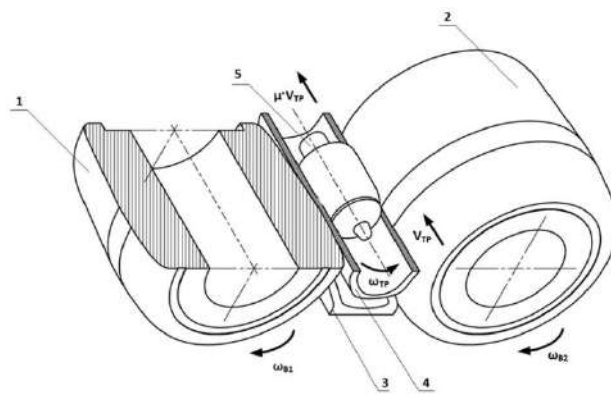


Рис. 2. Схема процесса обкатки: 1, 2 – валки обкатного стана; 3 – направляющая проводка; 4 – труба; 5 – оправка

Fig. 2. The burnishing process diagram: 1, 2 are rolls of the burnishing mill; 3 is a guide block; 4 is a tube; 5 is a mandrel

Материал заготовки выбран в соответствии со справочными данными для стали 45 ГОСТ 1050-2013 в виде таблиц данных для различных степеней и скоростей деформации при температуре материала 900°C

1200°C. Геометрия трубной заготовки импортируется в виде сетки КЭ из решения задачи по прокатке заготовки на автоматстане, при которой получены концевые дефекты, аналогичные имеющим место на производстве [5]. Импортируемая сетка КЭ содержит данные о компонентах напряжений и деформаций, рассчитанных для операции раскатки горячекатаной трубы, что позволяет учесть их в качестве начальных условий модели. Пример начальной геометрии трубной заготовки перед задачей в обкатную машину представлен на **рис. 3**.



Рис. 3. Начальная геометрия трубной заготовки перед задачей в обкатную машину
Fig. 3. Initial geometry of the tube workpiece before feeding to the burnishing machine

Бочкообразные валки устанавливаются наклонно к оси заготовки на угол подачи с межвалковым расстоянием по калибру трубы и совершают сложное движение, сочетающее вращение вокруг своей оси и оси прокатки. Оправка и проводка устанавливаются отно-

сительно прокатных валков в продольном направлении таким образом, чтобы избежать дефектов трубы в виде скручивания, продавливания наружной поверхности рабочих поясков валка или заклинивания трубы между оправкой и проводкой. При продольном перемещении труба вращается вокруг проводки и оправки со скоростью обкатки ее валками (с возможностью уменьшения продольной скорости перемещения для учета проскальзывания трубы). Взаимодействие между заготовкой и инструментом задается с помощью показателя трения по Зибелю, который варьируется от 0,2 до 0,5.

В качестве иллюстрации на **рис. 4** изображено промежуточное положение заготовки в клети обкатной машины в момент попадания в валки дефектного конца трубы.

Особенностями задачи для выбранного диапазона моделирования являются разностенность труб, уникальная для каждого типоразмера за счет выпусков калибра автоматстана, и размеры продольных «плавников». Раскатка местных утолщений, а также попадание в очаг деформации продольных складок различных размеров поперечных сечений и, таким образом, взаимодействие между ними и прокатным инструментом при обкатывании трубы сопровождается переменным характером изменения энергосиловых параметров. Программный пакет позволяет в узлах сетки КЭ построить поля напряжений и скоростей деформаций и путем согласованных вычислений получить конечное формоизменение созданной сетки и энергосиловые параметры процесса для прокатного инструмента. Примеры подобных полей представлены на **рис. 5**.

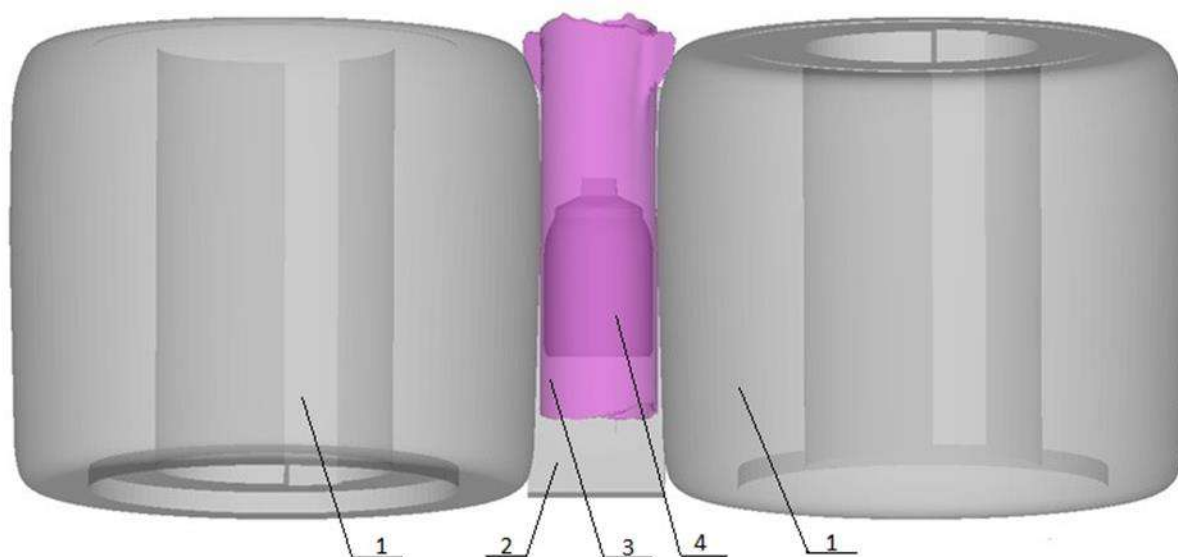


Рис. 4. Схема обкатки трубы с оправкой: 1 – валок; 2 – направляющая проводка; 3 – труба; 4 – оправка (расположена внутри трубы по оси)

Fig. 4. Tube burnishing with the mandrel: 1 is a roll; 2 is a guide block; 3 is a tube; 4 is a mandrel (inside the tube along the axis)

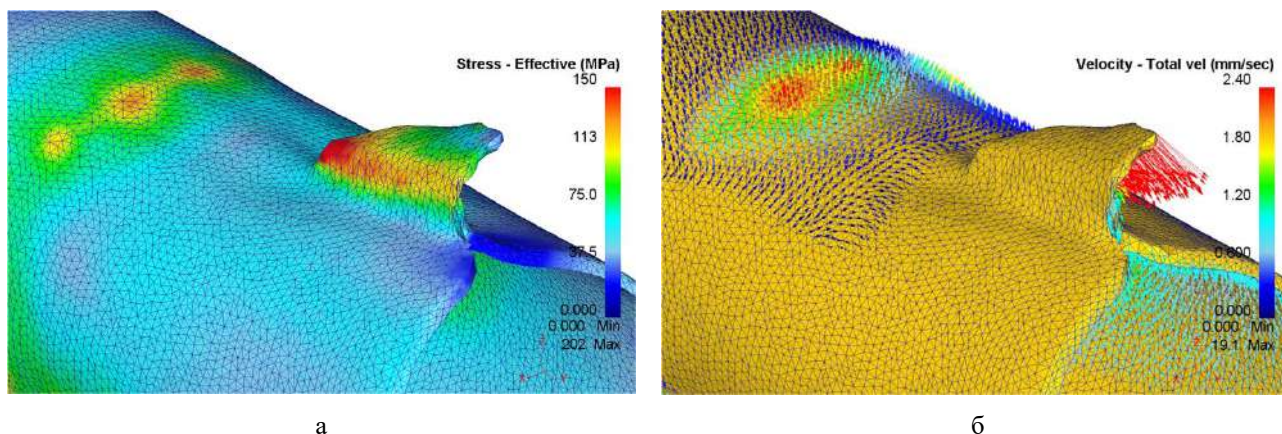


Рис. 5. Примеры эпюр параметров напряженно-деформированного состояния заготовки в момент попадания заднего продольного дефекта в калибр валков: а – эквивалентные напряжения; б – линейные скорости в КЭ-узлах

Fig. 5. Reference curves of the stress and strain state parameters of the workpiece, when the longitudinal end defect is in the roll pass: a are equivalent stresses; б are linear velocities in FE nodes

Полученные результаты

Рассмотрим результаты, полученные при обработке данных моделирования процесса. В задачи исследования входило выявление характеристик процесса при попадании в калибр обкатной машины участка трубы с продольными концевыми дефектами («плавниками»).

На рис. 6 и 7 представлены примеры графиков изменения усилий и моментов прокатки. Как видно из графиков, значения энергосиловых параметров не являются постоянными. Они колеблются в процессе поперечно-винтовой прокатки на конической оправке в клети обкатной машины за счет разностенности заготовки, получаемой после автоматического стана. При попадании в калибр концевой дефекта имеет место ярко выраженный пик, превышающий номинальные значения, характерные для стационарной стадии обкатки трубы.



Рис. 6. График изменения усилия обкатки
Fig. 6. Burnishing force behavior graph

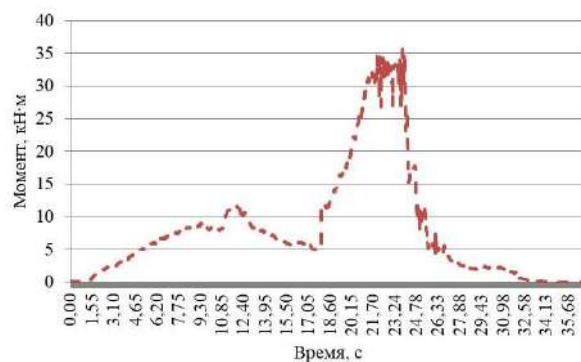


Рис. 7. График изменения момента обкатки
Fig. 7. Burnishing torque behavior graph

Рассмотрим особенности протекания процесса на стадии раскатки продольного дефекта («плавника») на заднем конце трубы. При попадании продольного дефекта («плавника») в очаг деформации обкатной машины процесс поперечно-винтовой прокатки совмещается с процессом гибки дефекта. Стадии гибки «плавников» в калибре обкатной машины представлены на рис. 8.

В некоторых случаях притормаживание трубы при гибке продольных дефектов может приводить к закручиванию трубы вокруг собственной оси.

Вне зависимости от геометрии дефекта и его размеров происходит постепенное складывание плавника вдоль наружной поверхности трубы с возрастанием площади соприкосновения заготовки и вала, а также появлением, таким образом, локального утолщения стенки. Геометрия трубы после обкатки представлена на рис. 9. Все эти факторы должны приводить к росту энергосиловых параметров.

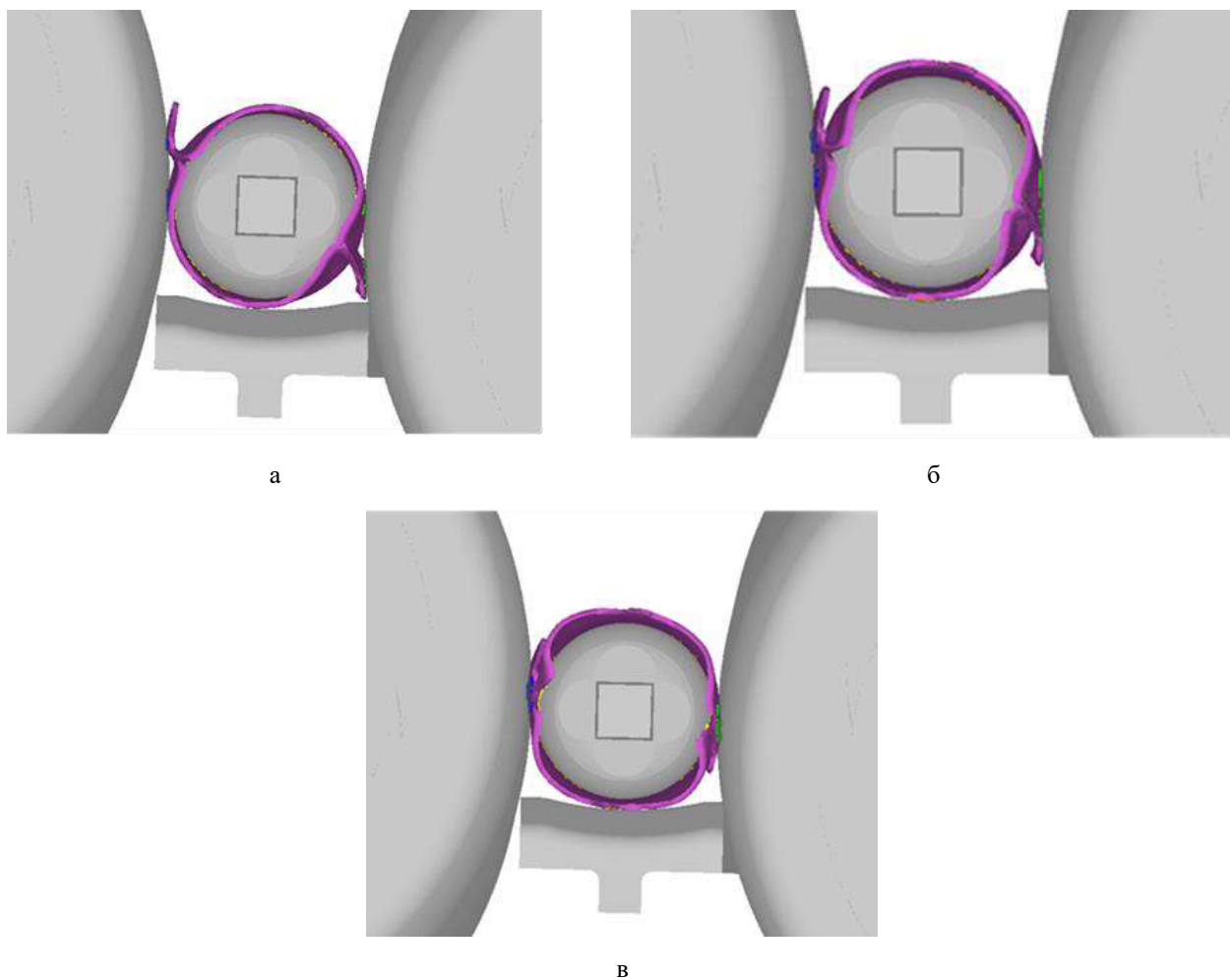


Рис. 8. Разглаживание концевых дефектов в обкатной машине: а-в – стадии процесса
Fig. 8. Leveling end defects in the burnishing machine: а-в are process stages

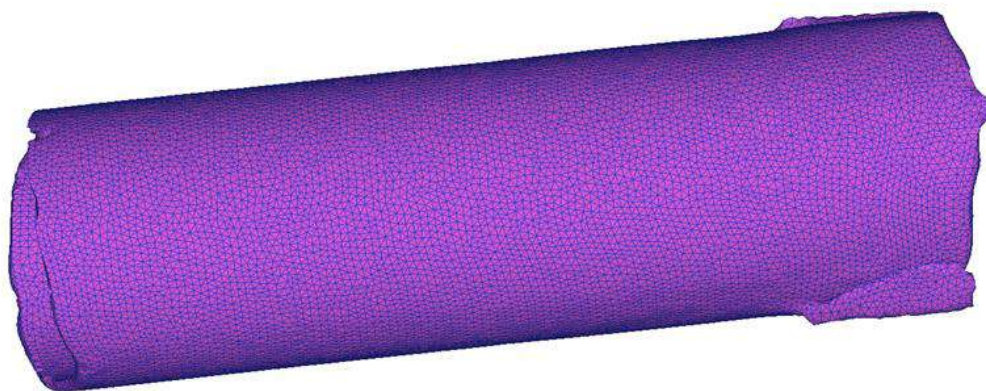


Рис. 9. Геометрия трубной заготовки после обкатки
Fig. 9. Tube workpiece geometry after burnishing

Заключение

Точность размеров горячедеформированных труб в значительной степени зависит от окончательных этапов получения трубы, что обеспечивается стабильностью расположения прокатного инструмента и уровнем его износа.

Продольные дефекты на заднем конце трубы, которые характерны при прокатке некоторых типоразмеров тонкостенных труб на трубопрокатных установках с автоматическим станом, приводят к неравномерной геометрии концов труб и пиковым нагрузкам на прокатный инструмент и при их разглаживании в последующих клетях обкатных и калибровочных станов трубопрокатных агрегатов.

Разработана математическая модель поперечно-винтовой прокатки тонкостенной трубы в двух-валковой обкатной машине с конической оправкой, которая позволяет установить физическую картину разглаживания продольных концевых дефектов труб («плавников») после автоматического стана. Полученные зависимости позволяют оценить нагрузки, действующие на прокатный инструмент и линию привода, что в дальнейшем позволит выбрать наиболее рациональные режимы обкатки для снижения величин нагрузок.

Список источников

1. Технология и оборудование трубного производства: учеб. пособие для вузов / Осадчий В.Я., Вавилин А.С., Зимовец В.Г., Коликов А.П. М.: Интермет Инжиниринг, 2007. 560 с.: ил.
2. Изучение трансформации дефектов поверхности при производстве труб в условиях ТПА-80 / Черных И.Н., Устьянцев В.Л., Литвинов М.А., Кривоногов И.Н. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». 2019. Т.19. №4. С. 27-36. DOI: 10.14529/met190404
3. Аль-Джумаили М.Ж.М., Выдрин А.В., Шкуратов Е.А. Влияние условий непрерывной раскатки гильз на технологические параметры процесса // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». 2020. Т. 20. №1. С. 60-67. DOI: 10.14529/met200107
4. Выдрин А.В., Аль-Джумаили М.Ж.М., Шкуратов Е.А. Алгоритм расчета энергосиловых параметров процесса раскатки гильзы в непрерывном стане // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №2. С. 32-37. DOI: 10.18503/1995-2732-2019-17-2-32-37
5. Checulin Y.B., Morgunov V.A., & Fedulov A.A. Increasing the stability of the pipe rolling process on an automatic mill. Materials Today: Proceedings, 2019, 19, pp. 2234-2238. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.541>
6. Fedulov A.A., Belyaev S.Y., Morgunov V.A., Bulganina M.Y., & Khasenov R K. Exclusion of the pipe

rear end defects in the process of the PRP 220 rolling using the FE modeling. В I. V. Kovalev, A.A. Stupina, & A.A. Voroshilova (Ред.), Proceedings of the III International Conference on Advanced Technologies in Materials Science, Mechanical and Automation Engineering, MIP: Engineering-III 2021 [070010] (AIP Conference Proceedings; Том 2402). American Institute of Physics Inc. <https://doi.org/10.1063/5.0071420>

7. Belyaev S.Y., Fedulov A.A., Bulganina M.Y., & Kuznetsov V.I. Studying the process of pipe reeling based on the monitoring of the drive's loading parameters. Materials Today: Proceedings, 2021, vol. 38, pp. 1813-1816. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.425>
8. Роговой А.А., Салихова Н.К. Численное моделирование технологического процесса горячей обработки слитка давлением // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2022. №3. С. 135-146. DOI: 10.15593/perm.mech/2022.3.14
9. Ларин С.Н., Пасынков А.А., Бессмертная Ю.В. К оценке предельных возможностей многооперационной вытяжки // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. Вып. 5. С. 302-306. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-5-302-306
10. Железков О.С., Лактюшин А.А., Макаров Б.Б. Силовые параметры и формоизменение при радиальной локальной осадке цилиндрической заготовки // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. Вып. 3. С. 42-46. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-3-42-46
11. Вяткина Д.В., Звонов С.Ю. Моделирование процесса отбортовки при разной геометрии инструмента // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2021. Т. 23. №6. С. 42-46. DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-6-42-46
12. Zinger A.A., Zhakupov A.N., Bogomolov A.V. Predicting steel mechanical properties using computer modeling in deform 3D // Наука и техника Казахстана. 2022. № 1. С. 71-80. DOI: 10.48081/RLYO5699

References

1. Osadchii V.Ya., Vavilin A.S., Zimovets V.G., Kolikov A.P. *Tekhnologiya i oborudovanie trubnogo proizvodstva* [Theory and equipment of pipe production]. Moscow: Intermet Engineering, 2007, 560 p. (In Russ.)
2. Chernykh I.N., Ustyantsev V.L., Litvinov M.A., Krivonogov I.N. Study on surface defect transformations during pipe manufacturing using tube mill 80. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Metallurgiya»* [Bulletin of South Ural State University. Series: Metallurgy]. 2019;19(4):27-36. (In Russ.) DOI: 10.14529/met190404
3. Al-Jumaili M.J.M., Vydrin A.V., Shkuratov E.A. Influence of the conditions of continuous rolling of sleeves on the process parameters. *Vestnik Yuzhno-*

- Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Metallurgiya»* [Bulletin of South Ural State University. Series: Metallurgy]. 2020;20(1):60-67. (In Russ.) DOI: 10.14529/met200107
4. Vydrin A.V., Al-Jumaili M.J.M., Shkuratov E.A. Algorithm for calculating the energy parameters of the process of rolling hollow billets on a continuous mill. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019;17(2):32-37. (In Russ.) DOI: 10.18503/1995-2732-2019-17-2-32-37
 5. Checulin Y.B., Morgunov V.A., Fedulov A.A. Increasing the stability of the pipe rolling process on an automatic mill. *Materials Today: Proceedings*. 2019;19:2234-2238. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.541>
 6. Fedulov A.A., Belyaev S.Yu., Morgunov V.A., Bulgagina M.Yu., Khasenov R.K. Exclusion of the pipe rear end defects in the process of the PRP 220 rolling using the FE modeling. *Proceedings of the 3rd International Conference on Advanced Technologies in Materials Science, Mechanical and Automation Engineering, MIP: Engineering-III. Krasnoyarsk. 2021;2402(1): Article ID 070010.* <https://doi.org/10.1063/5.0071420>
 7. Belyaev S.Yu., Fedulov A.A., Bulgagina M.Yu., Kuznetsov V.I. Studying the process of pipe reeling based on the monitoring of the drive's loading parameters. *Materials Today: Proceedings*. 2021;38:1813-1816. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.425>
 8. Rogovoy A.A., Salikhova N.K. Numerical simulation of the nickel alloy microstructure formed in the process of hot fogging. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika* [Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanics]. 2022;(3):135-146. (In Russ.) DOI: 10.15593/perm.mech/2022.3.14
 9. Larin S.N., Pasyukov A.A., Bessmertnaya Yu.V. To the evaluation of the limiting capabilities of the multi-operation drawing. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Engineering Sciences]. 2022;(5):302-306. (In Russ.) DOI: 10.24412/2071-6168-2022-5-302-306
 10. Zhelezkov O.S., Laktyushin A.A., Makarov B.B. Power parameters and shape change in the radial local draft of a cylindrical billet. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Engineering Sciences]. 2021;(3):42-46. (In Russ.) DOI: 10.24412/2071-6168-2021-3-42-46
 11. Vyatkina D.V., Zvonov S.Yu. Modeling the process of cutting with different geometry of the tool. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk* [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2021;23(6):42-46. (In Russ.) DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-6-42-46
 12. Zinger A.A., Zhakupov A.N., Bogomolov A.V. Predicting steel mechanical properties using computer modeling in DEFORM 3D. *Nauka i tekhnika Kazakhstana* [Science and Technology of Kazakhstan]. 2022;(1):71-80. DOI: 10.48081/RLYO5699

Поступила 20.06.2023; принята к публикации 08.09.2023; опубликована 25.12.2023

Submitted 20/06/2023; revised 08/09/2023; published 25/12/2023

Федулов Артем Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия. Email: a.a.fedulov@urfu.ru. ORCID 0000-0002-5271-5310

Беляев Сергей Юрьевич – кандидат технических наук, доцент, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия. Email: s.iu.beliaev@urfu.ru. ORCID 0009-0007-4137-1069

Булганина Марина Юрьевна – ведущий инженер, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия. Email: marina.bulgagina@urfu.ru. ORCID 0009-0009-7833-7846

Раскатов Евгений Юрьевич – доктор технических наук, заведующий кафедрой металлургических и роторных машин, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия. Email: e.j.raskatov@urfu.ru. ORCID 0000-0002-5640-9580

Artem A. Fedulov – PhD (Eng.), Associate Professor, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia. Email: a.a.fedulov@urfu.ru. ORCID 0000-0002-5271-5310

Sergey Yu. Belyaev – PhD (Eng.), Associate Professor, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia. Email: s.iu.beliaev@urfu.ru. ORCID 0009-0007-4137-1069

Marina Yu. Bulgagina – Lead Engineer, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia. Email: marina.bulgagina@urfu.ru. ORCID 0009-0009-7833-7846

Evgeny Yu. Raskatov – DrSc (Eng.), Head of the Department of Metallurgical and Rotary Machines, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia. Email: e.j.raskatov@urfu.ru. ORCID 0000-0002-5640-9580



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.793
DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-4-148-156

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ ПОРОШКОВЫХ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

Бодров Е.Г.¹, Серебряков И.С.², Латфулина Ю.С.³,
Напримерова Е.Д.³, Мясоедов В.А.³, Самодурова М.Н.³

¹ АО «КОНАР», Челябинск, Россия

² SARDOU SA, Сен-Суппле, Франция

³ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Постановка задачи. В статье представлены результаты моделирования процесса холодного газодинамического напыления порошковых покрытий. Этот процесс заключается в формировании покрытия за счет деформации металлических частиц при высокоскоростном столкновении с твердой поверхностью. Сложность взаимодействия частиц и подложки при варьировании параметров процесса холодного газодинамического напыления обуславливает необходимость использования математического моделирования для прогнозирования возможности формирования покрытий. **Цель работы.** Разработать математическую модель потока газа и движения частиц при холодном газодинамическом напылении с учетом специфики существующих областей газового потока и размера частиц порошка. **Используемые методы.** Для расчета параметров газа внутри сопла Лавала использованы изоэнтропийные формулы; расчет параметров напыляемых производили с учетом значений числа Маха и числа Рейнольдса. **Новизна полученных результатов.** Разработана математическая модель движения потока газа в процессе холодного газодинамического напыления. Данная модель позволяет точно рассчитывать расход газа в коротких хорошо профилированных соплах со сходящимся дозвуковым потоком. Разработана математическая модель для расчета параметров напыляемых частиц и определения их напыляемости. Теоретически показано, что параметры напыления в процессе холодного газодинамического напыления могут быть рассчитаны с учетом нормированных параметров скорости или энергии частиц. **Практическая значимость.** На основании разработанных математических моделей произведен расчет параметров холодного газодинамического напыления, влияющих на свойства получаемых покрытий для частиц размером от 5 до 45 мкм. Получены закономерности, определяющие возможность нанесения порошка определенной фракции, а также зависимости скорости и температуры частиц от их размера. Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования параметров холодного газодинамического напыления материалов с низкой температурой плавления.

Ключевые слова: холодное газодинамическое напыление, математическое моделирование, газовый поток, порошковый материал, размер частиц, температура частиц порошка, скорость частиц порошка, эффективность напыления

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание на выполнение фундаментальных научных исследований №FENU-2023-0013 (2023013ГЗ)).

© Бодров Е.Г., Серебряков И.С., Латфулина Ю.С., Напримерова Е.Д., Мясоедов В.А., Самодурова М.Н., 2023

Для цитирования

Математическое моделирование процесса холодного газодинамического напыления порошковых цветных металлов / Бодров Е.Г., Серебряков И.С., Латфулина Ю.С., Напримерова Е.Д., Мясоедов В.А., Самодурова М.Н. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №4. С. 148-156. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-148-156>



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

MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF COLD GAS DYNAMIC SPRAYING OF POWDER NON-FERROUS METALS

Bodrov E.G.¹, Serebriakov I.S.², Latfulina Yu.S.³,
Naprimeroва E.D.³, Myasoedov V.A.³, Samodurova M.N.³

¹ KONAR JSC, Chelyabinsk, Russia

² SARDOU SA, Saint-Soupplets, France

³ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Problem Statement. The paper presents the results of modeling the process of cold gas dynamic spraying of powder coatings. This process involves the deformation of metal particles by high-speed collision with a solid surface. The complexity of the interaction between particles and the substrate, when varying the parameters of the cold gas dynamic spraying process, contributes to using the mathematical modeling to predict the possibility of forming coatings. **Objectives.** The research is aimed at developing the mathematical model of gas flow and particle movement during cold gas dynamic spraying, factoring into the peculiarities of existing areas of gas flow and the size of powder particles. **Methods Applied.** Isentropic formulas were used to calculate the gas parameters inside the de Laval nozzle; the sprayed particle parameters were calculated, factoring into the values of the Mach number and the Reynolds number. **Originality.** The authors developed the mathematical model of the movement of gas flow in the process of cold gas dynamic spraying. This model is used to calculate accurately the gas consumption in short, well-contoured nozzles with a converging subsonic flow. The mathematical model was developed to calculate the parameters of sprayed particles and determine their sprayability. It has been shown theoretically that the spraying parameters in the process of cold gas dynamic spraying can be calculated factoring into the regulated parameters of particle speed or energy. **Practical Relevance.** Based on the developed mathematical models, the authors calculated the parameters of cold gas dynamic spraying, which have effect on the properties of the resulting coatings for particles ranging in size from 5 to 45 micrometers. The paper contains the obtained regularities that determine the possibility to apply powder of a certain fraction, as well as the dependence between speed and temperature of particles and their size. The results obtained can be used to predict the parameters of cold gas dynamic spraying of materials with low melting temperature.

Keywords: cold gas dynamic spraying, mathematical modeling, gas flow, powder material, particle size, powder particle temperature, powder particle speed, spraying efficiency

This research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (the state order for basic research, grant FENU-2023-0013).

For citation

Bodrov E.G., Serebriakov I.S., Latfulina Yu.S., Naprimeroва E.D., Myasoedov V.A., Samodurova M.N. Mathematical Modeling of the Process of Cold Gas Dynamic Spraying of Powder Non-Ferrous Metals. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 4, pp. 148-156. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-148-156>

Обоснование важности применения математического моделирования

При холодном напылении частицы перед ударом о подложку ускоряются в предварительно нагретом газовом потоке высокого давления, проходящем через сопло типа де Лавалья. В отличие от традиционного термического напыления, частицы перед ударом нагреваются незначительно. Скорость удара находится в диапазоне 200-1200 м/с и зависит в основном от геометрии сопла, размера и формы частиц, типа технологического газа, а также от таких параметров технологического газа, как давление и температура. Частицы, попадающие на поверхность, образуют плотное покрытие с малым содержанием оксидов. Связь при холодном напылении возникает из-за деформации частиц

при ударе и зависит от условий столкновения и различных свойств порошка.

До настоящего времени основное внимание при оптимизации процесса холодного распыления уделялось разработке форм сопел, обеспечивающих более эффективное ускорение частиц. В большинстве случаев распыляемые порошки настраивались на тонкий гранулометрический состав, поскольку только мелкие частицы достигают требуемых для склеивания высоких скоростей. В более поздних публикациях также показано, что стратегия использования как можно более мелких частиц для достижения максимальных скоростей частиц не является эффективной для достижения оптимального качества покрытия, поскольку пренебрегаются эффекты размера, которые могут быть очень важны для сцепления соударяющихся частиц.

Эти размерные эффекты могут быть основаны на динамических эффектах, таких как очень быстрая тепловая компенсация локализованного тепла, выделяемого при ударе, а также повышение прочности за счет деформационного упрочнения. Кроме того, роль таких эффектов может играть и более высокое отношение поверхности к объему частиц меньшего размера.

Оптимизация микроструктуры и свойств покрытия требует систематического варьирования условий напыления, что особенно для неизвестных напыляемых материалов может быть трудоемким и дорогостоящим. Для оптимизации процесса используется обобщенное описание ударных явлений, содержащее влияние размера частиц и температуры их соударения на склеивание. Это обобщенное описание дает несколько простых уравнений для оценки оптимальных условий удара, работающих с общими свойствами материала, которые доступны для большинства материалов. Эти рассчитанные условия воздействия реализуются с помощью недавно разработанного блока управления температурой, встроенного в традиционное оборудование для холодного распыления.

Температура и скорость металлических частиц в процессе холодного газодинамического напыления имеют большое значение, так как они влияют на их способность к адгезии на подложке. Частицы должны деформироваться и проявлять адиабатические явления неустойчивости вблизи поверхности, чтобы обеспечить прочное сцепление. Однако важно соблюдать баланс между скоростью столкновения частиц и их тепловой энергией. Экспериментальные методы измерения скорости частиц могут иметь ограничения в измерении малых частиц размером около 30 мкм при ожидаемых скоростях от 500 до 900 м/с. Для получения точных значений скорости и температуры частиц предлагается использовать численное моделирование.

Основа для моделирования потоков газа и частиц

Известно, что скорость звука зависит от температуры газа. Таким образом, повышение температуры технологического газа при холодном распылении, соответственно, приводит к увеличению скорости газа в сопле. Достижимая скорость частиц зависит в основном от скорости ускоряемого газового потока и, во вторую очередь, от его плотности. Ограничение температуры газа, связанное с закупоркой сопла или теплостойкостью материала сопла, является основным препятствием для дальнейшего развития процесса холодного распыления, так как это ограничивает достижимую скорость соударения частиц и, как следствие, достижимую температуру соударения частиц. Повышение температуры соударения частиц приводит к снижению критической скорости напыляемого материала вследствие термического размягчения. Критическая скорость снижается по мере увеличения размера частиц и, в конце концов, выходит на плато. Скорость столкновения частиц имеет максимум, так как очень

маленькие частицы ускоряются до высоких скоростей, но замедляются в ударной волне перед основой. Более крупные частицы ускоряются меньше в газовом потоке и, следовательно, имеют меньшую скорость столкновения. Там, где ударная скорость выше критической, частицы слипаются при идеальных условиях столкновения (вертикальное столкновение с плоской поверхностью). Между пересечениями критической скорости и скорости удара находится оптимальная фракция частиц для данного режима распыления. Для получения наилучшего сцепления частиц и качества покрытия необходимо стремиться использовать фракцию порошка, находящуюся в центре этого оптимального распределения, а также увеличивать расстояние между двумя линиями в этой области.

Скорость соударения частиц может быть увеличена за счет конструкции сопла, более высокой температуры газа или более высокого давления газа. Критическая скорость может быть уменьшена за счет более высокой температуры соударения частиц и большего размера частиц. Качество покрытия и сцепление медных покрытий, полученных холодным распылением, могут быть значительно улучшены за счет использования новых стратегий оптимизации. Для этого все скорости и температуры частиц определяются с помощью газодинамических расчетов. В этих расчетах расширение газа в сопле принимается изэнтропийным. Замедление частиц перед подложкой (эффект носового удара) реализуется с помощью простого приближения.

Из-за малого размера используемых порошков (менее 30 мкм) сложно точно измерить скорость частиц, а измерение температуры с использованием современных методов полностью невозможно. Таким образом, необходимо использовать моделирование движения газового потока, содержащего порошковые частицы.

В настоящее время для расчета газовых потоков используется программное обеспечение FLUENT на основе численного решения уравнений Навье-Стокса. Моделирование потока во FLUENT применяется к относительно длинным соплам, которые характерны для холодного газодинамического напыления. Процесс расчета может занимать несколько часов или даже дней. Однако в контексте процесса холодного газодинамического напыления параметры газового потока не всегда являются наиболее важными. Вместо этого первостепенное значение имеют параметры распыляемых частиц, такие как их температура и скорость на выходе из сопла (для сравнения с экспериментальными данными) и при контакте с подложкой (для оценки вероятности формирования покрытия). Целью данного исследования является разработка модели и соответствующего программного обеспечения, позволяющего выполнить эти расчеты быстро и с высокой точностью.

Уравнения идеального газа могут быть использованы для быстрого расчета параметров газового потока и применимы для решения широкого круга задач, связанных с исследованием дозвуковых и сверхзвуковых течений газа. Однако идеальные уравнения газа в их

первоначальной форме не подходят для моделирования процессов холодного газодинамического напыления из-за существования пограничного слоя у стенки сопла и высоких скоростей возмущений в сжатом слое, образующемся на поверхности подложки [1-5]. Эти уравнения можно было бы исправить с помощью эмпирических приближений.

В общем случае моделирование движения газового потока включает в себя следующие области:

1. Сходящаяся (дозвуковая) область – без пограничного слоя, используются исходные идеальные уравнения газа.

2. Расходящаяся (сверхзвуковая) область – учитывается пограничный слой при движении газа в сопле.

3. Область свободной струи – используется эмпирическое уравнение изобарного потока.

4. Сжатый слой – особая область с высокими колебаниями числа Маха, где идеальные уравнения газа неприменимы [6, 7].

Вычисление потока газа и движения частиц будет производиться отдельно без учета влияния твердой фазы на газовую фазу, поскольку массовый расход частиц значительно меньше, чем массовый расход газа.

Математическое моделирование движения потока газа

Так называемые изоэнтропийные формулы могут использоваться в качестве приближения для расчета параметров газа внутри сопла Лаваля. Эти формулы получены на основе сохранения энтальпии, законов газовой динамики, сохранения энтропии и уравнения идеального состояния газа. Рассматривается только случай одномерного потока, то есть параметры газа зависят только от продольной координаты.

Сначала для расчета задается самое узкое сечение сопла S_{cr} , которое называется критическим сечением. Далее задается форма сходящегося и расходящегося участков. Обычно эта форма представляет собой конус с постоянным сечением или задается специальным профилем $S(z)$, где z – продольная координата, начинающаяся в сходящемся участке. Вместо абсолютной скорости газового потока в газовой динамике используется коэффициент скорости k , который является отношением между абсолютной скоростью газа и критической скоростью a_{cr} , определенной локальной температурой торможения T_0 :

$$a_{cr} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} R_a T_0}, \quad (1)$$

где k – удельный коэффициент теплопередачи газа (1,4 – для воздуха и азота, 1,67 – для гелия); R_a – удельный газовый показатель, который определяется как отношение универсальной газовой константы к молекулярной массе газа.

Используется число Маха, которое представляет собой отношение абсолютной скорости газа к локальной скорости звука:

$$M = \frac{v}{a}, \quad (2)$$

где $a = \sqrt{k R_a T}$.

Отношение между коэффициентом скорости и числом Маха можно выводить с использованием любого из этих чисел:

$$\lambda = \frac{M}{\sqrt{\frac{2}{(k+1)\left(1 + \frac{k-1}{2} M^2\right)}}}, \quad (3)$$

$$M = \frac{\lambda}{\sqrt{\frac{k+1}{2}\left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2\right)}}. \quad (4)$$

Большинство уравнений записывается более удобно, если использовать коэффициент скорости вместо числа Маха, поэтому для настоящих расчетов выбран этот метод [9-11].

Распределение коэффициента скорости вдоль сопла вычисляется следующим образом:

$$\frac{S_{cr}}{S(z)} = \lambda(z) \left(\frac{1 - b \lambda(z)^2}{1 - b} \right)^{\frac{1}{k-1}}, \quad (5)$$

$$\text{где } b = \frac{k-1}{k+1}. \quad (6)$$

Следует отметить, что скорость потока не может быть напрямую получена из этого уравнения. Вместо этого необходимо использовать методы решения нелинейных уравнений. После определения коэффициента скорости остальные параметры газа могут быть легко определены с использованием следующих формул:

$$\frac{T}{T_0} = 1 - b \lambda^2; \quad (7)$$

$$\frac{p}{p_0} = \left(1 - b \lambda^2 \right)^{\frac{1}{k-1}}; \quad (8)$$

$$\frac{p}{p_0} = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^k, \quad (9)$$

где T – локальная температура газа, К; ρ – локальная плотность газа, кг/м³; p – локальное давление, МПа. Параметры, помеченные индексом «0», являются параметрами стагнации.

Заметим, что изоэнтропийные потоки сохраняют параметры стагнации. Таким образом, достаточно вычислить их значения на входе в сопло и использовать для дальнейших расчетов как константы. Кроме того,

давление и температура в предкамере обычно близки к давлению и температуре неподвижного газа. Таким образом, остается только вычислить плотность торможения, используя уравнение состояния идеального газа:

$$\rho = \frac{p}{R_a T}. \quad (10)$$

Вышеописанная модель может точно рассчитывать расход газа в коротких хорошо профилированных соплах со сходящимся дозвуковым потоком. Для повышения точности расчетов для длинных сопел, используемых в холодном газодинамическом напылении, необходимо учесть трение газа о стенки сопла.

Модель, основанная на задаче обтекания плоской пластины, хорошо изучена экспериментально и теоретически. В условиях обтекания плоской пластины пограничный слой начинает расти с переднего края. Для этого классическая замкнутая полумпирическая модель строится на основе уравнения импульсов Кармана и хорошо описывается в работе [8].

Важной частью является моделирование потока на цели. Рассмотрим удар сверхзвукового потока на нормально расположенную плоскость. Газ замедляется и возникает обратное движение перед поверхностью цели. Переход от сверхзвукового к дозвуковому режиму происходит из-за столкновения, происходящего на определенном расстоянии z_w от поверхности цели. Между плоскостью цели и плоскостью ударного фронта образуется слой газа с высоким давлением и высокой плотностью. Вероятно, мелкие частицы, которые проходят через этот сжатый слой, теряют часть своей скорости. Чем толще сжатый слой, тем больше потеря скорости.

Определить распределение числа Маха (отношение скорости течения к скорости звука в среде) в сжатом слое сложно. В исследовании используется известный метод аппроксимации полиномами для определения чисел Маха и их производных между двумя точками. Начальная точка выбирается на оси струи в точке удара.

На основе обширных экспериментальных данных [12-18] определяют однородность градиента скорости в начальной точке потока. Однородность подразумевает, что градиенты скорости одинаковы в соответствии с законом сохранения циркуляции скорости в

точке торможения, то есть $\left| \frac{\partial M}{\partial y} \right| = \left| \frac{\partial M}{\partial z} \right|$.

Расчет параметров частиц в потоке газа

Скорость частиц. Скорость частиц в потоке рассчитывали по формуле

$$m_p v_p \frac{dv_p}{dz} = C_x \frac{\rho(v - v_p)^2}{2} S_{mid}. \quad (11)$$

Формула также учитывает значения числа Маха и числа Рейнольдса:

$$M_p = \frac{\rho(v - v_p)^2 d_p}{a}; \quad (12)$$

$$Re_p = \frac{\rho(v - v_p)^2 d_p}{\mu}. \quad (13)$$

Значение коэффициента сопротивления C_x может быть найдено при помощи приближения Хендерсона.

Инертные законы нагрева или охлаждения применяются, когда температура частиц меньше температуры испарения T_{vap} и после того, как часть летучей фракции частицы $f_{v,0}$ была поглощена. Эти условия могут быть записаны как

$$T_p < T_{vap}, \quad (14)$$

$$m_p \leq (1 - f_{v,0}) m_{p,0}, \quad (15)$$

где T_p – температура частицы, К; $m_{p,0}$ – начальная масса частицы, г; m_p – текущая масса частицы, г.

Используя простой баланс тепла, связанный с температурой частиц $T_p(t)$, с конвективным теплообменом и поглощением/испусканием излучения на поверхности частицы, получим

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) + \epsilon_p A_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4). \quad (16)$$

По расчетам для частиц диаметром менее 36 мкм градиент температуры отсутствует.

Критическая скорость частиц. Важным параметром для получения покрытий методом холодного газодинамического напыления является критическая скорость напыления частиц меди, которая вычисляется по формуле

$$v_{cr} = \sqrt{\frac{a\sigma}{\rho} + b C_p (T_m - T_p)}, \quad (17)$$

где $a = 4$; $b = 0,25$; $\rho = 8790 \text{ кг/м}^3$; $C_p = 390 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$; $T_m = 1357 \text{ К}$; T_p – температура частицы, зависящая от температуры газа и размера частицы, К; σ – предел прочности частицы, зависящий от температуры газа и температуры частицы, МПа.

Параметры напыляемости частиц. Ещё одним важным параметром является коэффициент η , который определяет эффективность процесса холодного газодинамического напыления в зависимости от температуры потока газа и скорости частицы:

$$\eta = \frac{v_{imp}}{v_{cr}}. \quad (18)$$

Соотношение между свойствами и скоростями не является универсальным и лучше всего подходит для

частиц с низкой температурой. Например, при приближении к температуре плавления критическая скорость стремится к нулю, и, следовательно, соотношение скоростей становится бесконечно велико. Поэтому при более высоких температурах данные могут быть лучше поняты с учётом энергетического параметра. В любом случае параметры свойств напыления в холодном газодинамическом напылении могут быть рассчитаны с учётом этих нормированных параметров скорости или энергии.

Результаты моделирования

Для оценки возможности напыления порошка были проведены аналогичные расчеты для частиц размером от 5 до 45 микрон. В результате был построен ряд кривых, показывающих возможность нанесения порошка определенной фракции, а также зависимости скорости и температуры частиц от их размера.

На рис. 1 показаны линии зависимости критической скорости от температуры частицы, а также точками показаны положения частиц в зависимости от скорости и температуры частицы.

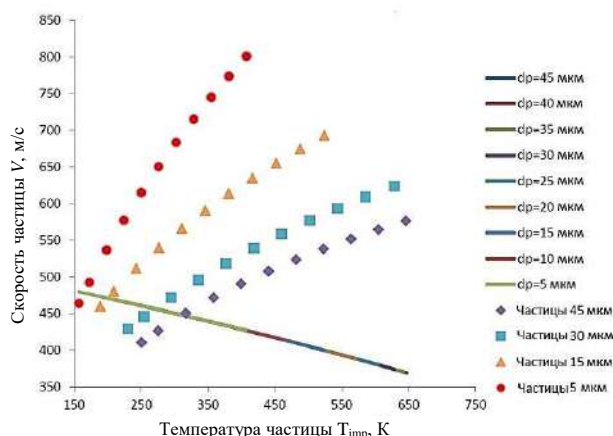


Рис. 1. Зависимость скорости напыляемых частиц от их температуры в процессе холодного газодинамического напыления

Fig. 1. Dependence between speed of sprayed particles and their temperature in the process of cold gas dynamic spraying

Очевидно, что точки частиц, находящиеся выше линий критических скоростей, будут напыляться на подложку.

На рис. 2 показаны графики изменения температуры и скорости частицы в зависимости от её размера. Из полученных данных видно, что по мере увеличения размера частицы ее скорость полета уменьшается, а температура, до которой она нагревается в газовом потоке, возрастает. Можно также сказать, что чем выше температура газового потока, тем выше скорость частицы и, следовательно, выше ее способность образовывать связь с подложкой. Это также видно на графике на рис. 3. Исходя из этого, следует, что с увеличением температуры газа увеличивается эффективность напыления частиц.

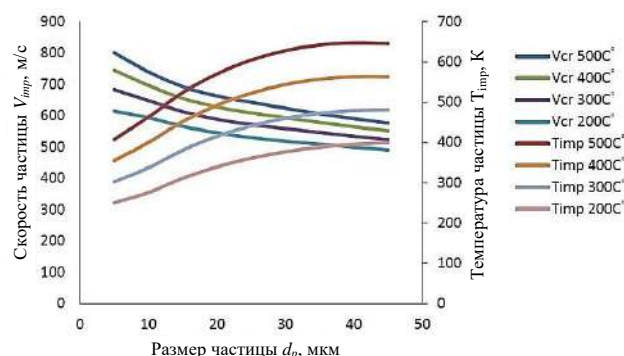


Рис. 2. Изменение температуры и скорости частицы в зависимости от её размера в процессе холодного газодинамического напыления

Fig. 2. Change in temperature and speed of a particle depending on its size in the process of cold gas dynamic spraying

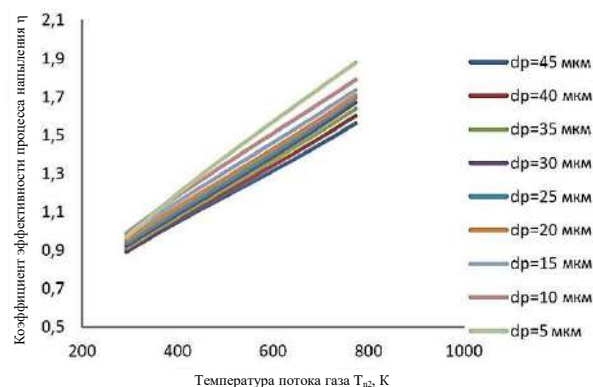


Рис. 3. Зависимость параметра эффективности напыления частицы от температуры потока газа в процессе холодного газодинамического напыления

Fig. 3. Dependence between the particle spraying efficiency parameter and the gas flow temperature in the process of cold gas dynamic spraying

Заключение

Особенности процесса холодного газодинамического напыления и происходящие в процессе формирования покрытия взаимодействия напыляемого порошка с подложкой являются достаточно специфическими. Если скорость столкновения частиц превышает определенный критический уровень, это вызывает значительную пластическую деформацию частиц и иногда поверхности подложки. Это приводит к разрушению тонких пленок на поверхности частиц и подложки, что способствует тесному контакту между химически активными материалами частиц и подложки. В результате этого данный метод нанесения покрытий характеризуется достаточно высокой прочностью сцепления покрытия с подложкой. Затем частицы ускоряются и нагреваются в сверхзвуковом распылительном сопле посредством высокоскоростной газовой струи. В газовом потоке частицы уско-

ряются и нагреваются из-за их взаимодействия с газовой фазой. Все эти факторы являются основанием для проведения глубоких теоретических исследований для понимания процессов взаимодействия разнородных по фазовому составу материалов при высокой скорости их взаимодействия.

Для обоснования режимов холодного газодинамического напыления с целью получения покрытий из легкоплавких материалов разработаны математические модели, позволяющие теоретически описать как газовый поток, так и поведение порошковых частиц в высокоскоростной газовой среде. Отличительной особенностью разработанных моделей является возможность получения количественных зависимостей поведения порошковых частиц широкого диапазона размеров в процессе холодного газодинамического напыления. Полученные результаты являются основанием для разработки технологических режимов холодного газодинамического напыления для получения покрытий различного функционального назначения.

Список источников

1. Kumar S., Reddy Sai Kiran, Joshi S.V. Microstructure and performance of cold sprayed Al-SiC composite coatings with high fraction of particulates // *Surface & Coatings Technology*. 2017, vol. 318, pp. 62-71.
2. Onur Meydanoglu, Bertrand Jodoin, E. Sabri Kayali. Microstructure, mechanical properties and corrosion performance of 7075 Al matrix ceramic particle reinforced composite coatings produced by the cold gas dynamic spraying process // *Surface and Coatings Technology*. 2013, vol. 235, pp. 108-116.
3. The effect of metal coatings on the interfacial bonding strength of ceramics to copper in sintered Cu-SiC composites / Dariusz M. Jarzabek, Michał Milczarek, Tomasz Wojciechowski, Cezary Dziekoński, Marcin Chmielewski // *Ceramics International*. 2017, no. 43, pp. 5283-5291.
4. Cold spraying: from process fundamentals towards advanced applications / S. Grigoriev, A. Okunkova, A. Sova, P. Bertrand, I. Smurov // *Surf. Coat. Technol.* 2015, no. 268, pp. 77-84.
5. Thermal conductivity of graphite flakes-SiC particles/metal composites / R. Prieto, J.M. Molina, J. Narciso, E. Louis // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2011, no. 42, pp. 1970-1977.
6. Tazegul O., Dylmishi V., Cimenoglu H. Copper matrix composite coatings produced by cold spraying process for electrical applications // *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2016, vol. 16, iss. 3, pp. 344-350.
7. Corrosion protection and electrical conductivity of copper coatings deposited by low-pressure cold spraying / M. Winnicki, A. Małachowska, A. Baszczuk, M. Rutkowska-Gorczyca, D. Kukla, M. Lachowicz, A. Ambroziak // *Surface & Coatings Technology*. 2017, vol. 318, pp. 90-98.
8. Tribological Behavior of a Cold-Sprayed Cu-MoS₂ Composite Coating During Dry Sliding Wear / Zhang Y., Michael Shockley J., Vo P. et al. // *Tribol Lett.* 2016, no. 62, Article 9.
9. Ternary Cu-CNT-AlN composite coatings consolidated by cold spray deposition of mechanically alloyed powders / E.J.T. Pialago, O.K. Kwon, M.-S. Kim, C.W. Park // *Journal of Alloys and Compounds*. 2015, vol. 650, pp. 199-209.
10. Microstructure and tribological behavior of copper and composite copper+alumina cold sprayed coatings for various alumina contents / Kostoula I. Triantou, Dimitris I. Pantelis, V. Guipont, M. Jeandin // *Wear*. 2015, vol. 336, pp. 96-107.
11. Boron Carbide (B₄C) – Properties and Information about Boron Carbide [Электронный ресурс] // *The AZo Journal of Materials Online*: [сайт]. 2001. URL: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=75> (дата обращения: 17.10.2023).
12. Nucleate pool boiling of R134a on cold sprayed Cu-CNT-SiC and Cu-CNT-AlN composite coatings / E.J.T. Pialago, O.K. Kwon, J.S. Jin, C.W. Park // *Applied Thermal Engineering*. 2016, vol. 103, pp. 684-694.
13. Electrochemical corrosion and mathematical model of cold spray Cu-Cu₂O coating in NaCl solution - Part I: Tafel polarization region model / D. Rui, L. Xiangbo, W. Jia, X. Likun // *Int. J. Electrochem. Sci.* 2013, no. 8, pp. 5902-5924.
14. Макейкин А.М. Методика планирования многофакторного эксперимента влияния режимов холодного газодинамического напыления на коэффициент использования материала // *Вестник науки*. 2023. №7 (64). С. 275-279.
15. Волков А.О. Обзор холодного газодинамического напыления: проблемы и перспективы // *Автомобильный транспорт*. 2019. №45. С. 91-102.
16. Холодное газодинамическое напыление покрытий (обзор) / Козлов И.А., Лещев К.А., Никифоров А.А., Демин С.А. // *Труды ВИАМ*. 2020. №8(90). С. 77-93.
17. Реализация процесса нанесения покрытия медь-вольфрам методом холодного газодинамического напыления / Латфулина Ю.С., Дубенская М., Самодурова М.Н., Трофимов Е.А., Барков Л.А. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова*. 2021. №2. С. 40-49.
18. Структурно-фазовые превращения в покрытиях на основе частиц меди и цинка, нанесенном газодинамическим напылением / В.Е. Архипов, Т.И. Мурavyeva, М.С. Пугачев, О.О. Щербакова // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2020. №4(778). С. 32-36.

References

1. Kumar S., Reddy Sai Kiran, Joshi S.V. Microstructure and performance of cold sprayed Al-SiC composite coatings with high fraction of particulates. *Surface and Coatings Technology*. 2017;318:62-71.
2. Onur Meydanoglu, Bertrand Jodoin, E. Sabri Kayali.

- Microstructure, mechanical properties and corrosion performance of 7075 Al matrix ceramic particle reinforced composite coatings produced by the cold gas dynamic spraying process. *Surface and Coatings Technology*. 2013;235:108-116.
3. Dariusz M. Jarzabek, Michał Milczarek, Tomasz Wojciechowski, Cezary Dziekoński, Marcin Chmielewski. The effect of metal coatings on the interfacial bonding strength of ceramics to copper in sintered Cu-SiC composites. *Ceramics International*. 2017;43:5283-5291.
 4. Grigoriev S., Okunkova A., Sova A., Bertrand P., Smurov I. Cold spraying: from process fundamentals towards advanced applications. *Surf. Coat. Technol.* 2015;268:77-84.
 5. Prieto R., Molina J.M., Narciso J., Louis E. Thermal conductivity of graphite flakes-SiC particles/metal composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2011;42:1970-1977.
 6. Tazegul O., Dylmishi V., Cimenoglu H. Copper matrix composite coatings produced by cold spraying process for electrical applications. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2016;16(3):344-350.
 7. Winnicki M., Małachowska A., Baszczuk A., Rutkowska-Gorczyca M., Kukla D., Lachowicz M., Ambroziak A. Corrosion protection and electrical conductivity of copper coatings deposited by low-pressure cold spraying. *Surface and Coatings Technology*. 2017;318:90-98.
 8. Zhang Y., Michael Shockley J., Vo P. et al. Tribological behavior of a cold-sprayed Cu-MoS₂ composite coating during dry sliding wear. *Tribology Letters*. 2016;62:9. <https://doi.org/10.1007/s11249-016-0646-2>
 9. Pialago E.J.T., Kwon O.K., Kim M.-S., Park C.W. Ternary Cu-CNT-AlN composite coatings consolidated by cold spray deposition of mechanically alloyed powders. *Journal of Alloys and Compounds*. 2015;650:199-209.
 10. Kostoula I., Triantou, Dimitris I. Pantelis, Guipont V., Jeandin M. Microstructure and tribological behavior of copper and composite copper+alumina cold sprayed coatings for various alumina contents. *Wear*. 2015;336-337:96-107.
 11. Boron carbide (B₄C) – Properties and information about boron carbide. The AZo Journal of Materials Online. Available at: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=75> (Accessed on October 17, 2023).
 12. Pialago E.J.T., Kwon O.K., Jin J.S., Park C.W. Nucleate pool boiling of R134a on cold sprayed Cu-CNT-SiC and Cu-CNT-AlN composite coatings. *Applied Thermal Engineering*. 2016;103:684-694.
 13. Rui D., Xiangbo L., Jia W., Likun X. Electrochemical corrosion and mathematical model of cold spray Cu-Cu₂O coating in NaCl solution - Part I: Tafel polarization region model. *Int. J. Electrochem. Sci.* 2013;8:5902-5924.
 14. Makeykin A.M. Methodology for planning multifactorial experiment of influence of cold gas dynamic spraying modes on the material utilization factor. *Vestnik nauki* [Bulletin of Science]. 2023;(7(64)):275-279. (In Russ.)
 15. Volkov A.O. Overview of cold gas dynamic spraying: problems and prospects. *Avtomobilnyi transport* [Automobile Transport]. 2019;(45):91-102. (In Russ.)
 16. Kozlov I.A., Leshchev K.A., Nikiforov A.A., Demin S.A. Cold gas dynamic spraying of coatings (review). *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM]. 2020;(8(90)):77-93. (In Russ.)
 17. Latfulina Yu.S., Doubenskaia M., Samodurova M.N., Trofimov E.A., Barkov L.A. Implementation of a copper-tungsten coating by cold gas dynamic spraying. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021;(2):40-49. (In Russ.)
 18. Arkhipov V.E., Muravyeva T.I., Pugachev M.S., Shcherbakova O.O. Structural-phase transformations in the coating based on copper and zinc particles applied by gas dynamic spraying. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metal Science and Heat Treatment]. 2020;(4(778)):32-36. (In Russ.)

Поступила 04.10.2023; принята к публикации 16.11.2023; опубликована 25.12.2023
Submitted 04/10/2023; revised 16/11/2023; published 25/12/2023

Бодров Евгений Геннадьевич – технический директор, АО «КОНАР», Челябинск, Россия.

Email: bodrov.evgeniy@konar.ru.

Серебряков Иван Сергеевич – кандидат технических наук, инженер, SARDOU SA,

Сен-Суппле, Франция. Email: ivan-serebr@yandex.ru.

Латфулина Юлия Сергеевна – научный сотрудник,

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.

Email: latfulina174@gmail.com. ORCID 0000-0002-2128-3965

Напримерова Елена Дмитриевна – аспирант,

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.

Email: naprimerovaed@susu.ru.

Мясоедов Вячеслав Александрович – студент,

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.

Email: vmyasoedov74@mail.ru.

Самодурова Марина Николаевна – доктор технических наук, профессор,
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: samodurovamn@susu.ru. ORCID 0000-0002-1505-1068

Evgeniy G. Bodrov – Technical Director,
KONAR JSC, Chelyabinsk, Russia.
Email: bodrov.evgeniy@konar.ru

Ivan S. Serebriakov – PhD (Eng.), Engineer,
SARDOU SA, Saint-Soupplets, France.
Email: ivan-serebr@yandex.ru.

Yuliya S. Latfulina – Research Associate,
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: latfulina174@gmail.com. ORCID 0000-0002-2128-3965

Elena D. Naprimerova – postgraduate student,
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: naprimerovaed@susu.ru.

Vyacheslav A. Myasoedov – student,
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: vmyasoedov74@mail.ru.

Marina N. Samodurova – DrSc (Eng.), Professor,
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: samodurovamn@susu.ru. ORCID 0000-0002-1505-1068

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ NEW TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.19
DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-4-157-163



ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МОНОЛИТНОГО РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА В УСЛОВИЯХ МЕЛКИХ СЕРИЙ НА ОСНОВЕ ЭКСПРЕСС-ИСПЫТАНИЙ

Маслов Д.А.¹, Овсянников В.Е.², Кулемина А.А.², Ковенский И.М.²

¹ Курганский государственный университет, Курган, Россия

² Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Среднегодовой объем рынка металлообрабатывающего инструмента в России составляет 21 млрд руб. При этом современная ситуация характеризуется тем, что потребность в металлорежущем инструменте возрастает. Однако наблюдается негативная тенденция в снижении доли отечественного инструмента в общем объеме рынка. Если в 2017 году доля отечественного инструмента составляла 42%, то за 2022 год она снизилась до 25%. При этом существенной проблемой является контроль качества инструмента. Причем проблема усугубляется сжатыми сроками на подготовку производства. Также следует отметить, что организация крупных инструментальных производств требует очень больших материальных затрат и не всегда оправдана. Поэтому необходимо совершенствовать организационные и технологические аспекты в условиях мелких серий. Выходом в данной ситуации является использование экспресс-испытаний непосредственно при изготовлении инструмента. **Цель работы.** Снижение сроков постановки на производство опытных партий монолитного осевого режущего инструмента из быстрорежущих сталей и твердых сплавов. **Используемые методы.** В работе использованы методы технологии машиностроения, испытаний на стойкость инструмента, нанесения износостойких покрытий. Рассматривается полный технологический процесс изготовления монолитного режущего инструмента, включая контроль качества и предварительные испытания. В работе рассматривается инструмент в диапазоне размеров (по диаметру) от 6 до 16 мм. **Новизна.** Разработан новый метод исследования – экспресс-испытания монолитного режущего инструмента, кроме того, получены новые данные в результате экспресс-испытаний. **Результат.** Разработанная методика экспресс-испытаний монолитного режущего инструмента, который позволяет повысить контроль качества монолитного режущего инструмента в условиях мелкосерийного производства. **Практическая значимость.** Разработанный метод экспресс-испытаний позволяет существенно сократить сроки технологической подготовки производства монолитного режущего инструмента за счет исключения необходимости производственных испытаний с последующей доводкой образцов. Кроме того, определены оптимальные режимы испытаний, которые обеспечивают сочетание адекватности результатов (по отношению к производственным испытаниям), а с другой – минимальное время испытаний.

Ключевые слова: инструмент, производство, испытания, сокращение, стойкость

© Маслов Д.А., Овсянников В.Е., Кулемина А.А., Ковенский И.М., 2023

Для цитирования

Повышение эффективности изготовления монолитного режущего инструмента в условиях мелких серий на основе экспресс-испытаний / Маслов Д.А., Овсянников В.Е., Кулемина А.А., Ковенский И.М. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №4. С. 157-163. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-157-163>



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

INCREASED EFFICIENCY OF MANUFACTURING MONOLITHIC CUTTING TOOLS IN SMALL BATCHES BASED ON EXPRESS TESTS

Maslov D.A.¹, Ovsyannikov V.E.², Kulemina A.A.², Kovensky I.M.²

¹ Kurgan State University, Kurgan, Russia

² Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The average annual volume of the metalworking tool market in Russia is 21 billion rubles. The current situation is characterized by an increasing need for metal cutting tools. However, there is a negative trend in a decrease in the share of domestic tools in the total market volume. If in 2017 the share of domestic tools was 42%, then in 2022 it decreased to 25%. Quality control of tools is a significant problem. Moreover, the problem is aggravated by tight deadlines for the preparation of production. It should be also noted that organizing large tool-making industries requires very large material costs and is not always reasonable. Therefore, it is necessary to improve the organizational and technological aspects in small batches. The solution in this situation is to use express tests directly in manufacturing tools. **Objectives.** Reduced time for production of pilot batches of monolithic axial cutting tools made of high-speed steels and hard alloys. **Methods Applied.** The research uses methods of engineering technology, tests for tool resistance, and application of wear-resistant coatings. The paper describes a complete manufacturing process of the monolithic cutting tool, including quality control and preliminary tests. The paper presents the tool in the size range (by diameter) from 6 to 16 mm. **Originality.** The authors developed a new research method, namely express testing of a monolithic cutting tool, and obtained new data as a result of express testing. **Result.** The result includes a developed procedure for express testing of monolithic cutting tools, increasing quality control of monolithic cutting tools in small batches. **Practical Relevance.** The developed express test method significantly reduces a period required for preparing production of monolithic cutting tools by eliminating the need for production tests with subsequent refinement of samples. Besides, the authors determined optimal test modes that provide a combination of adequacy of results (in relation to production tests) and minimum test time.

Keywords: tool, manufacturing, testing, reduction, resistance

For citation

Maslov D.A., Ovsyannikov V.E., Kulemina A.A., Kovensky I.M. Increased Efficiency of Manufacturing Monolithic Cutting Tools in Small Batches Based on Express Tests. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 4, pp. 157-163. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-157-163>

Введение

По данным Агентства маркетинговых исследований DISCOVERY ResearchGroup [1] среднегодовой объем рынка металлообрабатывающего инструмента в России составляет 21 млрд руб. При этом современная ситуация характеризуется тем, что потребность в металлорежущем инструменте возрастает. Примерное распределение потребителей по отраслям за 2021 год приведено на **рис. 1** [1].

Как можно видеть из **рис. 1**, основными потребителями инструмента (по объему рынка) являются оборонная промышленность и авиастроение. На сегодняшний день доля данного сегмента рынка только расширяется в связи с ростом потребности в соответствующей продукции.

При этом доля инструмента, который изготавливается в РФ (по отношению к общему объему рынка), снизилась. Если в 2017 году доля отечественного инструмента составляла 42%, то за 2022 год она снизилась до 25% [1].



Рис. 1. Структура потребления твердосплавного инструмента по отраслям, млрд руб.

Fig. 1. Structure of consumption of hard alloy tools by sector (in billion rubles)

Также следует отметить, что основной объем изготовления инструмента отводится крупным производителям (например, Кировградский завод твердых сплавов, Томский инструментальный завод и т.д.) [1] (рис. 2).

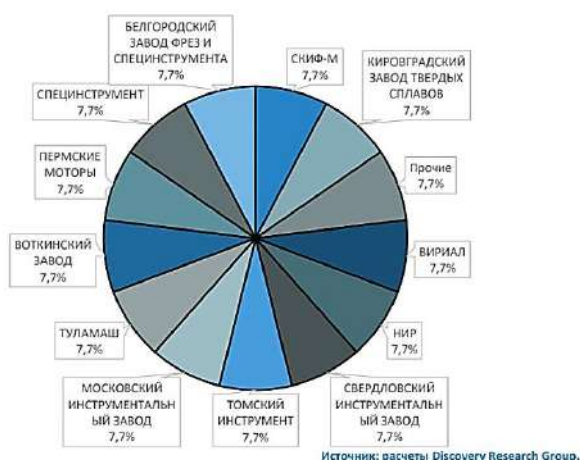


Рис. 2. Доля производителей твердосплавного режущего инструмента

Fig. 2. Share of hard alloy cutting tool manufacturers

Из рис. 2 видно, что общий удельный вес крупных производителей инструмента составляет более 90%. Однако данные предприятия не могут эффективно закрыть все нужды потребителей. Следует отметить, что организация крупных инструментальных производств требует очень больших материальных затрат и не всегда оправдана. Кроме того, существенной проблемой является то, что в рамках крупного предприятия затруднительно изготовление мелких серий инструмента, особенно специального.

Таблица 1. Номенклатура фрез

Table 1. Range of milling cutters

Параметры фрезы	Сплав		Геометрия			
			Распределение зубьев		Спираль	
			равномерная	неравномерная	равномерная	неравномерная
Фреза 6×25×60	TC10CM	VHS-11	+	–	+	–
Фреза 6×25×60	TC10CM	VHS-11	–	+	–	+
Фреза 8×30×70	TC10CM	VHS-11	+	–	+	–
Фреза 8×30×70	TC10CM	VHS-11	–	+	–	+
*Фреза 10×30×80	TC10CM	VHS-11	+	–	+	–
*Фреза 10×30×80	TC10CM	VHS-11	–	+	–	+
Фреза 12×40×80	TC10CM	VHS-11	+	–	+	–
Фреза 12×40×80	TC10CM	VHS-11	–	+	–	+
Фреза 14×40×80	TC10CM	VHS-11	+	–	+	–
Фреза 14×40×80	TC10CM	VHS-11	–	+	–	+
Фреза 16×40×80	TC10CM	VHS-11	+	–	+	–
Фреза 16×40×80	TC10CM	VHS-11	–	+	–	+

* Изделия-представители.

Выходом из данной ситуации является создание малых субъектов экономической деятельности, которые могут реализовать локальные заказы в рамках мелкосерийного типа производства. Но для эффективного решения данной задачи необходимо максимально сократить сроки технологической подготовки производства инструмента. В среднем при серийном изготовлении инструмента срок от заказа до получения готового продукта составляет от 4 месяцев до 1 года. Кроме того, изготовители инструмента чаще всего находятся на значительном расстоянии от потребителя. Также удаленность предполагает значительные накладные расходы (до 30-50%) [1, 2] в случае изготовления мелких серий непосредственно. Также зачастую вопросы эксплуатационных испытаний инструмента и подбора режимов его работы выполняются потребителем, после чего может возникнуть необходимость в доработке инструмента, особенно специального. Поэтому в рамках малых предприятий возможно реализовать максимально гибкий подход с целью эффективного удовлетворения нужд потребителя с получением им решений «под ключ». Это является залогом обеспечения конкурентоспособности малых предприятий с крупными производителями инструмента [2]. Поэтому необходимо проанализировать технологический процесс изготовления инструмента, выявить узкие места и определить направления для совершенствования (в части сокращения сроков изготовления нового инструмента).

Материалы и методы исследования

Номенклатура рассматриваемого инструмента приведена в табл. 1.

В работе рассматривался технологический процесс изготовления монолитного твердосплавного инструмента (фрез концевых), который состоит из следующих операций:

– 000. Отрезная. Станок отрезной ТОША-200М. На данной операции производится отрезка заготовки.

– 005. Шлифовальная. Станок для снятия фасок LIYOUONE. На данной операции шлифуют фаску на хвостовике заготовки. Пример фаски приведен на рис. 3.

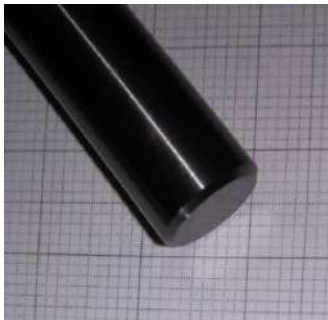


Рис. 3. Шлифование фаски
Fig. 3. Chamfer grinding

– 010. Шлифовальная. Станок с ЧПУ HAWEMAT 2500. На данной операции формируется геометрия режущей части инструмента.

Технологические режимы на шлифовальные операции назначались с учетом известных рекомендаций литературы [3, 4].

– 015. Контрольная. Предварительный контроль. На данной операции выполняется предварительный контроль инструмента. Пример контроля режущей кромки приведен на рис. 4.



Рис. 4. Контроль геометрических параметров
Fig. 4. Control of geometric parameters

– 020. Слесарная. Галтовочный барабан. На данной операции производится подготовка к нанесению покрытия.

– 025. Ультразвуковая. Пост ультразвуковой мойки. На данной операции производится очистка перед покрытием.

– 030. Вакуумная. Установка Unicoat-400 HIP. На данной операции выполняется нанесение покрытия. Метод нанесения покрытия PVD (физическое осаждение из паровой фазы). Способ нанесения – магнетронное распыление импульсами высокой мощности (HiPIMS). Твердый сплав: TiN, AlTiN.

– 035. Контрольная. Окончательный контроль.

Также предлагается ввести операцию 040, которая заключается в испытаниях инструмента непосредственно на станке.

– 040. Испытательная. Вертикально-фрезерный обрабатывающий центр DMG 635V. Проведение испытаний готового инструмента.

Можно сказать, что контроль изготовленных опытных образцов проводился в несколько этапов:

1. Контроль промежуточный (контроль геометрических параметров):

– визуальный контроль на цифровом микроскопе – осмотр режущей части образцов, сопоставление общей геометрии, полученной на образцах с цифровой моделью;

– измерение основных геометрических параметров на приборе для контроля режущего инструмента ELBO CONTROLLI NikkenHattori и на цифровом микроскопе.

2. Контроль окончательный (контроль качества покрытия):

– визуальный контроль на цифровом микроскопе – осмотр режущей части инструмента на предмет сплошности и целостности нанесенного покрытия, контроль цвета и его равномерности, контроль сорности, микротрещин;

– определение адгезии покрытия на диске-свидетеле с помощью твердомера Роквелла (Роквелл-тест) [5-7].

После проведения окончательного контроля изготовленных опытных образцов фрез были проведены экспресс-испытания.

Экспресс-испытания проводились на фрезерном станке с ЧПУ DMC-635 при обработке заготовки из стали 20.



Рис. 5. Схема экспресс-испытаний
Fig. 5. Express test diagram

При этом режимы обработки изначально принимались рекомендованные для рассматриваемого материала [8-10], а затем производилась корректировка с целью сокращения времени проведения испытаний без потери адекватности результатов.

Полученные результаты и их обсуждение

Были изготовлены образцы фрез из номенклатуры в табл. 1 по технологическому процессу, который приведен выше. После чего производились экспресс-испытания. Пример опытного образца и измерения фаски износа приведен на рис. 6.

Пример результатов испытаний приведен в табл. 2. Также была рассмотрена возможность форсиро-

вания режимов резания при испытаниях, чтобы повысить производительность. В частности, для конструкционных сталей адекватные результаты дает заданное значение стойкости в 10 мин, при форсировании режимов (относительно рекомендованных) на 15-20%, для цветных металлов заданное значение стойкости в 10 мин при форсировании режимов на 20-35%. Таким образом, время испытаний сокращается в 1,5-2 раза.



Рис. 6. Опытный образец фрезы и измерение фаски износа

Fig. 6. Pilot milling cutter and chamfer wear measurement

Таблица 2. Пример результатов испытаний

Table 2. Example of test results

Параметр	Обозначение	Значение
Глубина резания	t , мм	1,5
Подача	S , мм/зуб	0,04
Скорость резания	V , м/мин	120
Ширина фрезерования	B , мм	3
Заданная стойкость	T , мин	20
Обрабатываемый материал	Сталь 20	
Результат испытаний образца 1 (фреза $\varnothing 10$, 4 зуба, распределение зубьев равномерное, спираль равномерная)	Образец №1 отработал 25 мин на рекомендованных режимах обработки при нормированной стойкости $T = 20$ мин, при этом сохранив свои режущие свойства. Ширина фаски износа составила $h = 0,33$ мм при длине $l = 3,29$ мм. Инструмент рекомендуется для использования	
Результат испытаний образца 2 (фреза $\varnothing 10$, 4 зуба, распределение зубьев неравномерное, спираль равномерная)	Образец №2 отработал 20 мин на рекомендованных режимах обработки при нормированной стойкости $T = 20$ мин, при этом сохранив свои режущие свойства условно. Ориентировочно на 16 минуте изменился звук обработки, резко изменилось качество обработанной поверхности. Ширина фаски износа составила $h = 0,34$ мм при длине $l = 3,67$ мм. Инструмент требует доработки и не рекомендуется для использования	
Результат испытаний образца 3 (фреза $\varnothing 10$, 4 зуба, распределение зубьев неравномерное, спираль неравномерная)	Образец №3 отработал 15 мин на рекомендованных режимах обработки при нормированной стойкости $T = 20$ мин, при этом потеряв свои режущие свойства ориентировочно на 10 минуте работы. Испытания были остановлены. Ширина фаски износа составила $h = 0,38$ мм при длине $l = 3,84$ мм. Инструмент требует доработки и не рекомендуется для использования	

Заключение

Таким образом, на основе анализа технологического процесса изготовления монолитного режущего инструмента из твердых сплавов было установлено, что при мелкосерийном производстве необходимо включать операцию экспресс-испытаний, что позволит сократить сроки доводки инструмента до нужных параметров и повысить конкурентоспособность мелких производителей режущего инструмента. Также определены рациональные режимы экспресс-испытаний, которые позволяют сократить время операции в 1,5-2 раза. То есть в рамках мелких предприятий можно разрабатывать решения «под ключ», которые включают создание конструкции инструмента, его изготовление, подбор режимов и рекомендаций по эксплуатации, совершенствование инструмента. За счет указанных выше преимуществ и учитывая географическую близость к потребителям малые предприятия в ряде сегментов могут конкурировать с крупными. Немаловажным преимуществом является то, что указанный выше подход можно распространить и на восстановление изношенного инструмента, что позволяет расширить спектр заказчиков.

Список источников

1. Карпова Т. О развитии станкоинструментальной отрасли // Ритм машиностроения. 2022. №2. С. 4-6.
2. Бойцов А.Г. Обеспечение качества на всех этапах производства // Ритм машиностроения. 2022. №2. С. 15-19.
3. Звягольский Ю.С., Солоненко В.Г., Схиртладзе А.Г. Оснастка для заточки и контроля инструментов: учеб. пособие. Старый Оскол: Тонкие наукоемкие технологии, 2022. 244 с.
4. Звягольский Ю.С., Солоненко В.Г., Схиртладзе А.Г. Технология производства режущего инструмента. М.: КноРУС, 2012. 336 с.
5. Маркова Е.А., О.К. Яцкевич. Износостойкие покрытия для режущих инструментов: учеб. пособие. Минск: Изд-во БНТУ, 2021. 153 с.
6. Раменский В.В., Филиппов К.Ю. Сравнительный анализ методов определения твердости // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2022. Т. 1. С. 28-32.
7. Ярославцев В.М., Ярославцева Н.А. Методы упрочняющей технологии как средство совершенствования процесса резания // Упрочняющие технологии и покрытия. 2018. №1. С. 36-44.

8. Козлов А.А., Козлов А.М. Расчет режимов резания: учеб. пособие. Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2017. 96 с.
9. Дудак Н.С., Касенов А.Ж. Расчет режимов резания: учеб. пособие. Алматы: Эверо, 2015. 128 с.
10. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 1 / под ред. А.С. Васильева, А.А. Кутина. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Инновационное машиностроение, 2018. 756 с.

References

1. Karpova T. On the development of the machine tool industry. *Ritm mashinostroeniya* [Rhythm of Mechanical Engineering]. 2022;(2):4-6. (In Russ.)
2. Boitsov A.G. Quality assurance at all the process stages. *Ritm mashinostroeniya* [Rhythm of Mechanical Engineering]. 2022;(2):15-19. (In Russ.)
3. Zvyagolsky Yu.S., Solonenko V.G., Skhirtladze A.G. *Osnastka dlya zatochki i kontrolya instrumentov: ucheb. posobie* [Tooling for sharpening and controlling tools: study guide]. Stary Oskol: Tonkie naukoemkie tekhnologii, 2022, 244 p. (In Russ.)
4. Zvyagolsky Yu.S., Solonenko V.G., Skhirtladze A.G. *Tekhnologiya proizvodstva rezhushchego instrumenta* [Technology of cutting tool production]. Moscow: KnoRUS, 2012, 336 p. (In Russ.)
5. Markova E.A., Yatskevich O.K. *Iznosostoikie pokrytiya dlya rezhushchikh instrumentov: ucheb. posobie* [Wear-resistant coatings for cutting tools: study guide]. Minsk: Belarusian National Technical University, 2021, 153 p. (In Russ.)
6. Ramensky V.V., Filippov K.Yu. Comparative analysis of hardness test methods. *Aktualnye problemy aviatsii i kosmonavтики* [Current Problems of Aviation and Astronautics]. 2022;1:28-32. (In Russ.)
7. Yaroslavtsev V.M., Yaroslavtseva N.A. Hardening technology methods as a tool of improving the cutting process. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [Hardening Technologies and Coatings]. 2018;(1):36-44. (In Russ.)
8. Kozlov A.A., Kozlov A.M. *Raschet rezhimov rezaniya: ucheb. posobie* [Calculation of cutting modes: study guide]. Lipetsk: Lipetsk State Technical University, 2017, 96 p. (In Russ.)
9. Dudak N.S., Kasenov A.Zh. *Raschet rezhimov rezaniya: ucheb. posobie* [Calculation of cutting modes: study guide]. Almaty: Evero, 2015, 128 p. (In Russ.)
10. Vasilyev A.S., Kutin A.A. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitelya* [Reference book for technologists and mechanical engineers]. Moscow: Innovatsionnoe mashinostroenie, 2018, 756 p. (In Russ.)

Поступила 21.08.2023; принята к публикации 14.09.2023; опубликована 25.12.2023
Submitted 21/08/2023; revised 14/09/2023; published 25/12/2023

Маслов Денис Александрович – старший преподаватель,
Курганский государственный университет, Курган, Россия.
Email: masloff-denis@yandex.ru. ORCID 0000-0003-3263-2419

Овсянников Виктор Евгеньевич – доктор технических наук, доцент,
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия.
Email: vik9800@mail.ru. ORCID0000-0002-8775-0781

Кулемина Алёна Александровна – кандидат технических наук, доцент,
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия.
Email: kuleminaaa@tyuiu.ru. ORCID 0000-0003-2076-166X

Ковенский Илья Моисеевич – доктор технических наук, профессор,
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия.
Email: kovenskijim@tyuiu.ru. ORCID 0000-0003-3241-8084

Denis A. Maslov – Senior Lecturer,
Kurgan State University, Kurgan, Russia.
Email: masloff-denis@yandex.ru. ORCID 0000-0003-3263-2419

Viktor E. Ovsyannikov – DrSc (Eng.), Associate Professor,
Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia.
Email: vik9800@mail.ru. ORCID0000-0002-8775-0781

Alena A. Kulemina – PhD (Eng.), Associate Professor,
Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia.
Email: kuleminaaa@tyuiu.ru. ORCID 0000-0003-2076-166X

Ilya M. Kovensky – DrSc (Eng.), Professor,
Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia.
Email: kovenskijim@tyuiu.ru. ORCID 0000-0003-3241-8084

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.9;621.926
DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-4-164-175



ПРИМЕНЕНИЕ ВИБРОПРИВОДОВ С МОДУЛИРУЮЩИМИ СВОЙСТВАМИ В ДРОБИЛКАХ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ФРАКЦИОННЫМ СОСТАВОМ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ

Сергеев Ю.С.¹, Платов С.И.², Гузеев В.И.¹, Сергеев С.В.¹

¹ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

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

Аннотация. При обогащении ценных минералов отбраковывают породу, не соответствующую требуемому качеству. Глубокая переработка таких отходов диспергированием позволит наиболее полно их использовать в других отраслях. На сегодня процесс разьединения минералов достигается только поэтапным дроблением, а традиционные способы не обеспечивают однородность дисперсных частиц. Это объясняется тем, что у таких пород сложное трехосное напряженное состояние, а разрушение при диспергировании может происходить либо по плоскостям напластования, либо по плоскостям с критическим значением комбинаций напряжений, характерных для данного минерала. Анизотропная структура среды может быть трансверсальной и ортотропной со своими характерными топологическими картинками тензоров напряжений. Поэтому при диспергировании для каждого вида текстуры среды желателен свой конкурирующий механизм разрушения. А поскольку у анизотропных материалов нет предсказуемости в формировании «сетки» трещин, то при использовании традиционных методов диспергирования невозможно управлять размером дисперсных частиц. В реальном твердом теле всегда существует система пространственных микро- и макродефектов, статически распределенных в массиве тела и частично выходящих на его поверхность. Такие дефекты обладают высокой подвижностью и способны к коагуляции и аннигиляции из-за теплового движения молекул и механических напряжений. Следовательно, процесс деформации тела сводится к увеличению размеров и количества макро- и микродефектов. Новая концепция размерного диспергирования хрупких сред обоснована повышением объемной геометрической однородности получаемых дисперсных частиц. Это можно достигнуть путем введения в зону разрушения материала комплексного управляемого вибрационного воздействия в виде принудительных амплитудно-модулируемых колебаний рабочего органа конусной дробилки для одновременного формирования разветвленной сети глубоких и поверхностных трещин. Такой подход управления трещинообразованием позволит одновременно добиваться квазиоднородности дисперсного продукта, а однородная крошка способствует реализации воксельного (селективного) принципа укладки дисперсных частиц, применяемых в композитах, так как они теснее укладываются.

Ключевые слова: диспергирование, хрупкие материалы, виброприводы с модулирующими свойствами, управление однородностью, производство дисперсных материалов, энергосберегающие станки

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (региональный конкурс Челябинской области) № 22-29-20067, <https://rscf.ru/project/22-29-20067/>.

© Сергеев Ю.С., Платов С.И., Гузеев В.И., Сергеев С.В., 2023

Для цитирования

Применение виброприводов с модулирующими свойствами в дробилках хрупких материалов для управления фракционным составом дисперсной фазы / Сергеев Ю.С., Платов С.И., Гузеев В.И., Сергеев С.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №4. С. 164-175. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-164-175>



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

APPLICATION OF VIBRATION DRIVES WITH MODULATING PROPERTIES IN CRUSHERS OF BRITTLE MATERIALS TO CONTROL THE FRACTIONAL COMPOSITION OF THE DISPERSED PHASE

Sergeev Yu.S.¹, Platov S.I.², Guzeev V.I.¹, Sergeev S.V.¹

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

² Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. When beneficiating valuable minerals, rock failing to meet the required quality is rejected. Downstream processing of such wastes by dispersing contributes to their fullest utilization in other industries. Today, the mineral separation process is achieved by step-by-step crushing only, and conventional methods do not ensure homogeneity of dispersed particles. This is explained by the fact that such rocks have a complex triaxial stress state, and the destruction during dispersion can occur along either the layering planes, or the planes with a critical value of stress combinations, characteristic of a given mineral. An anisotropic structure of the medium can be transversal and orthotropic with its characteristic topological patterns of stress tensors. Therefore, a different competing fracture mechanism is desirable for each type of medium texture during dispersion. Since anisotropic materials have no predictability in the formation of a “grid” of cracks, it is impossible to control the size of dispersed particles, when using conventional dispersing methods. Real solid bodies always contain a system of spatial micro- and macro-defects statically distributed in the body mass and partially extending to its surface. Such defects have high mobility and are capable of coagulation and annihilation due to thermal motion of molecules and mechanical stresses. Consequently, the process of deformation of the body is reduced to an increase in the size and number of macro- and micro-defects. A new concept of dimensional dispersion of brittle media is justified by increasing the volumetric geometric homogeneity of the resulting dispersed particles. This can be achieved by integrated controlled vibration introduced into the material fracture zone as forced amplitude-modulated vibrations of the working body of a cone crusher for a simultaneous formation of an extensive network of deep and surface cracks. This approach of crack formation control results in achieving quasi-homogeneity of the dispersed product at a time, and homogeneous crushed particles contribute to applying a voxel (selective) principle of stacking dispersed particles used in composites, as they are more closely stacked.

Keywords: dispersing, brittle materials, modulating vibration drives, homogeneity control, production of dispersed materials, energy-saving machines

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation (a regional competition of the Chelyabinsk Region), No. 22-29-20067, <https://rscf.ru/en/project/22-29-20067/>.

For citation

Sergeev Yu.S., Platov S.I., Guzeev V.I., Sergeev S.V. Application of Vibration Drives with Modulating Properties in Crushers of Brittle Materials to Control the Fractional Composition of the Dispersed Phase. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 4, pp. 164-175. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-164-175>

Введение

При индустриальном развитии один из сегментов экономики формирует производства, перерабатывающие отходы во вторсырьё. Развитие таких производств обеспечивает экологическую безопасность и экономит природные ресурсы [1]. При добыче минералов ценных пород – мрамора, змеевика, яшмы и других – отбраковывают породу, не соответствующую качеству основного сырья, либо из-за малости кусков, либо из-за включений в их друзах или жеодах. Такая порода поступает в отвалы [1] и не применяется. Глубокая переработка таких отходов может быть хорошим подспорьем в отраслях от стройиндустрии до художественной промышленности [2]. Примерами таких отраслей являются приготовление пигментов для красок и жидкого камня для элементов мебели, декоративного щебня для мозаики и панно,

материалов для ландшафтного дизайна и др., что позволяет переформатировать и дополнить строительный сектор. Такая тенденция объединяет искусство с промышленными производствами [3].

Современным трендом в прикладном искусстве является художественный промысел «картины из каменной крошки» [4]. Производство картин требует сырья в виде разноцветной (до 20 видов) каменной крошки с различной формой и дисперсностью от 0,1 до 8 мм. Художник укладывает кристаллы различной формы и цвета, фиксируя клеем в соответствии с художественным замыслом сюжета. В перечисленных отраслях производства возникает проблема обеспечения однородности частиц минералов. Процесс обогащения полезных ископаемых включает высвобождение зерен ценного минерала от пустой породы и их концентрацию. Разъединение минералов достигается дроблением до требуемой крупности с минимальным

переизмельчением [5]. Традиционные способы не обеспечивают однородность дисперсных частиц. Размерное же диспергирование вязких и хрупких материалов [6] позволяет реализовать воксельный (селективный) принцип укладки дисперсных частиц, так как они теснее укладываются, повышая укывистость поверхности и прочность покрытия.

В классической теории разрушения хрупких материалов допущением является их изотропность и однородность. Однако при высоких механических напряжениях структурные элементы минералов вместо беспорядочной ориентировки в поликристалле приобретают текстуру, в которой явно выражены главные направления пластических деформаций. Это главное, что проявляет анизотропность физико-механических свойств за пределом упругости. Поскольку в особенности у таких пород сложное трехосное напряженное состояние, то и разрушение при диспергировании может происходить либо по плоскостям напластования, являющимися по факту плоскостями ослабления, либо по плоскостям с критическим значением комбинаций напряжений типа Кулона-Мора [7] с коэффициентом сцепления и углом внутреннего трения, характерными для данного минерала в целом.

Анизотропная структура среды может быть трансверсальной и ортотропной со своими характерными топологическими картинами тензоров напряжений. Поэтому при диспергировании для каждого вида текстуры среды желателен свой конкурирующий механизм разрушения. А поскольку у анизотропных материалов нет предсказуемости в формировании «сетки» трещин, то при использовании традиционных методов диспергирования невозможно управлять размером дисперсных частиц. В реальном твердом теле всегда существует система пространственных микро- и макродефектов, статически распределенных в массиве тела и частично выходящих на его поверхность. Такие дефекты обладают высокой подвижностью и способны к коагуляции и аннигиляции из-за теплового движения молекул и механических напряжений. Следовательно, процесс деформации тела сводится к увеличению размеров и количества макро- и микродефектов. При достижении определенной плотности таких дефектов в массиве тела возникает трещина с размерами, превышающими критические. Далее рост трещины происходит самопроизвольно до разрушения тела. При уменьшении внешней нагрузки трещины в массиве тела смыкаются, а энергия аннигилированных поверхностей трансформируется в тепло. Этот процесс несовершенен, поскольку трещины в массиве тела смыкаются не полностью. Следовательно, при сообщении периодической нагрузки с каждым последующим циклом количество дефектов в теле будет прирастать, а прочность тела снижаться из-за усталости. Отсюда следует, что если телу сообщить энергию A , превышающую предельную энергию упругих деформаций A_y , то оно разрушится с образованием новой поверхности ΔS , величина которой пропорциональна энергии перенапряжения A_s . Тогда энергетический баланс процесса разрушения [8-10]

$$A = A_y + A_s = \frac{\sigma_p^2 V}{2E} + K_R \Delta S, \quad (1)$$

где σ_p – предельное напряжение упругих деформаций; V – объем тела; E – модуль Юнга; K_R – коэффициент Ребиндера, отражающий затраты работы на образование единицы новой поверхности; ΔS – удельная поверхность.

Работа образования новой поверхности A_s является полезной, а работа упругих деформаций A_y – это диссипативные потери. Поэтому коэффициент полезного действия (КПД) процесса измельчения

$$\eta_i = \frac{A_s}{A} = \frac{A_s}{A_y + A_s} = \frac{1}{1 + A_y/A_s}. \quad (2)$$

Из (2) следует, что КПД можно повысить либо увеличением перенапряжения A_s , например высокоскоростным ударом, либо уменьшением A_y , например снижением σ_p посредством поверхностно-активных веществ (ПАВ). Для роста трещин во времени гораздо предпочтителен первый вариант, поскольку ПАВ изменяет физико-химический состав материала. При малом же времени микродефекты не успевают мигрировать в область крупных трещин и прочность хрупкого тела возрастает. Поскольку прочность тела зависит от его габаритных размеров, то она возрастает с их уменьшением и обусловлена уменьшением максимальной длины трещины. Иными словами, если на хрупкое тело принудительно периодически воздействовать силой Q с малой амплитудой и достаточно высокой частотой (рис. 1, а), то оно полностью не разрушится, но от него будут отделяться маленькие частицы с размерами $K = 1/2, 1/4$ и т.д., по сравнению с массивом разрушаемого тела. Если, наоборот, к этому же телу приложить периодическое ударное усилие Q_1 с большой амплитудой, но низкой частотой (рис. 1, б), то оно разрушится на несколько крупных частей с размерами $K = 1$.

Значит, при низкой частоте и большой амплитуде глубина проникновения трещин будет больше, чем при высокой частоте и малой амплитуде. Однако по мере уменьшения размера измельчаемых частиц частоту воздействия необходимо увеличивать, а амплитуду уменьшать, поскольку размеры трещины в частице уменьшаются. Отсюда основные проблемы – это:

- ограниченность скорости соударения рабочего органа станка и массива при крупном измельчении (60-70 м/с), а при мелком и тонком – до 200 м/с;
- в вибромельницах уменьшение частоты вибропривода приводит к возрастанию мощности и увеличению амплитуды колебаний, а значит, к росту динамических реакций на опоры;
- многостадийность измельчения материала: крупное, среднее или мелкое из-за архаичности оборудования [5].

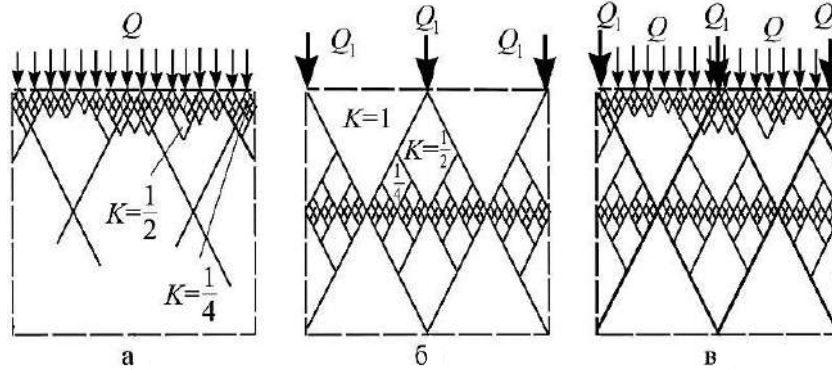


Рис. 1. Схема трещинообразования: а – при высокочастотном воздействии с небольшой амплитудой; б – при низкочастотном воздействии с большой амплитудой; в – при низко- и высокочастотных колебаниях

Fig. 1. Crack formation: а is at high-frequency impact and low amplitude; б is at low-frequency impact and high amplitude; в is at low- and high-frequency vibrations

Известно, что полезная мощность дробилок может быть повышена изменением частоты колебаний помольной камеры [10]. С ростом частоты колебаний вибропривода при постоянном моменте мощность возрастает быстрее, чем растут нагрузки, разрушающие опоры, а отношение полезной мощности вибропривода к центробежной силе пропорционально его моменту. Значит, при увеличении момента вибропривода, например применением синфазных виброприводов, мощность и производительность увеличатся в q_2 раз, то есть эффективность использования каждого вибропривода возрастет в q раз.

Методика проведения исследований

Наиболее перспективным способом борьбы с двумя первыми недостатками процесса разрушения хрупких материалов является переход от традиционного принципа дробления с заданной деформацией материала к принципу с заданным усилием [5, 11, 12]. Предлагается другой, более совершенный способ дробления, при котором все три указанных недостатка устраняются путем применения в дробилке роторно-дебалансного вибропривода [12]. Это позволяет совместить процессы предварительного и мелкого дробления хрупких материалов (рис. 1, в) за счет того, что на хрупкое тело можно оказывать разрушающее амплитудно-модулированное вибрационное воздействие. Причем, изменяя параметры амплитудно-модулированных колебаний, возможно управлять процессом хрупкого размерного измельчения за счет обеспечения сложных форм колебаний исполнительного органа станка. В предлагаемом роторно-дебалансном виброприводе (рис. 2, а) ротор 1 (массой m , жесткостью j и радиусом r_1) и подпружиненное контртело 3 сопрягают с тарированной силой P_{oc} прижима, обкатывают его по замкнутой траектории с амплитудой A , частотой ω_1 , создавая силу F_1 , и одновременно воздействуют на них вращающейся (с частотой ω_2 ротора 1) неуравновешенной радиальной силой F_2 , которая обеспечивается, например, вращением дебаланса 2 [12].

Для определения формы траектории создаваемых виброперемещений из-за колебаний, создаваемых роторно-дебалансным виброприводом, рассмотрим изменение радиус-вектора суммарной амплитуды A колебаний (рис. 2, б). Радиус-вектор суммарной амплитуды A колебаний равен

$$\bar{A} = \bar{A}_1 + \bar{A}_2, \quad (3)$$

где A_1 – радиус-вектор амплитуды колебаний ротора; A_2 – радиус-вектор амплитуды колебаний, генерируемых неуравновешенной радиальной силой F_2 .

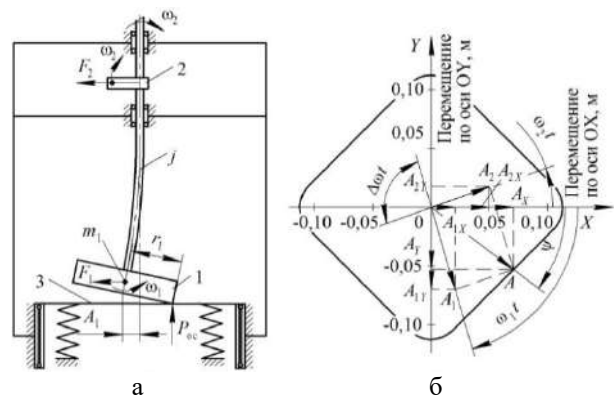


Рис. 2. Схема возбуждения амплитудно-модулированных колебаний: а – вибропривод; б – схема формирования сложной траектории виброперемещений

Fig. 2. Excitation of amplitude-modulated vibrations: а is by a vibration drive; б is formation of a complex trajectory of vibration displacements

Система уравнений проекций колебаний радиус-вектора суммарной амплитуды A имеет следующий вид:

$$\begin{cases} A_x = A_1 \cos(\omega_1 t) + A_2 \cos(\omega_2 t); \\ A_y = A_1 \sin(\omega_1 t) - A_2 \sin(\omega_2 t), \end{cases} \quad (4)$$

где ω_1 – частота колебаний ротора; ω_2 – частота вращения; t – рассматриваемый промежуток времени.

Введем обозначения и подставим в (4)

$$\begin{cases} \omega_1 + \omega_2 = \Delta\omega; \\ A_2 + A_1 \cos(\Delta\omega t) = A \cos \psi; \\ A_1 \sin(\Delta\omega t) = A \sin \psi, \end{cases} \quad (5)$$

получим систему уравнений

$$\begin{cases} A_x = A \cos(\psi - \omega_2 t); \\ A_y = A \sin(\psi - \omega_2 t), \end{cases} \quad (6)$$

где ψ – текущий угол.

Из системы уравнений (6) находим амплитуду радиус-вектора колебаний A :

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\Delta\omega t)}, \quad (7)$$

При этом амплитуда высокочастотных колебаний A_1 равна

$$A_1 = \frac{r_1 \omega_2}{\omega_1}, \quad (8)$$

где r_1 – радиус ротора; ω_1 – частота колебаний ротора; ω_2 – частота вращения ротора.

Общеизвестно, что амплитуда колебаний вынуждающей силы [5] равна

$$A_2 = \frac{F_2}{M \omega_2^2}, \quad (9)$$

где F_2 – неуравновешенная радиальная сила; ω_2 – частота вращения; M – суммарная масса тел.

Для определения амплитуды радиус-вектора колебаний A подставим выражения (8) и (9) в (7), получим

$$A = \sqrt{\left(\frac{r_1 \omega_2}{\omega_1}\right)^2 + \left(\frac{F_2}{M \omega_2^2}\right)^2 + 2 \frac{r_1 \omega_2 F_2}{\omega_1 M \omega_2^2} \cos(\Delta\omega t)}. \quad (10)$$

Введя коэффициенты

$$n = \frac{\omega_2}{\omega_1}, \quad k = \frac{1}{M \omega_2^2},$$

получим значение амплитуды радиус-вектора колебаний A :

$$A = \sqrt{(r_1 n)^2 + (F_2 k)^2 + 2 r_1 F_2 n k \cos(\Delta\omega t)}. \quad (11)$$

В этом выражении первое слагаемое под корнем $(r_1 n)^2$ – высокочастотная составляющая (по сравнению с частотой вращения), второе слагаемое $(F_2 k)^2$ – низкочастотная составляющая, зависящая от действия неуравновешенной радиальной силы F_2 , суммарной массы тел M , а третье слагаемое $2 r_1 F_2 n k \cos(\Delta\omega t)$ – составляющая разности фаз колебаний $\Delta\omega t$. Используя зависимость (11), управляют величиной суммарной амплитуды A , изменяя параметры этих составляющих. Требуемые параметры низкочастотных колебаний, вызванных неуравновешенной силой F_2 , зада-

ют посредством изменения скорости вращения ω_2 и величиной силы F_2 . Параметрами колебаний ротора (амплитуда A_1 и частота колебаний ω_1) управляют, например, посредством изменения осевой силы прижима $P_{ос}$ в соответствии с зависимостями, приведенными в [12]. Иными словами, формой траектории колебательных суммарных перемещений управляют посредством изменения частоты и амплитуды колебаний ротора и неуравновешенной радиальной силы.

Из приведенных уравнений видно, что радиус-вектор колебаний A зависит от частот ω_1 и ω_2 и амплитуд A_1 и A_2 колебаний ротора и неуравновешенной радиальной силы F_2 , а следовательно, форма траектории меняется от квазикруговой (рис. 3, а) до линейной (рис. 3, б), а при определенных условиях имеет многоугольную форму или даже фигуры Лиссажу (рис. 3, в), что подтверждено результатами компьютерного эксперимента [12].

Согласно [10] при вибрационном измельчении наблюдается при высоких частотах и малых амплитудах поверхностное распространение множества трещин (см. рис. 1, а), а при больших амплитудах и низких частотах колебания измельчающего органа – распространение единичных обширных трещин (см. рис. 1, б). Этот эффект применительно к измельчению хрупких материалов полезен тем, что в отличие от квазикруговой траектории, где скорость рабочего органа станка будет равномерной и менее эффективной, другие формы траектории рабочего органа станка будут иметь свои положительные эффекты. Например, при линейной форме траектории частота колебаний рабочего органа будет низкая, а амплитуда большой, что характерно для крупного измельчения, при траектории движения рабочего органа дробилки, имеющей форму круга или эллипса, частота колебаний будет высокой, а амплитуда маленькой, что характерно для мелкого измельчения.

При совмещении низко- и высокочастотных колебаний, то есть при их модуляции, трещинообразование произойдет как по поверхности, так и в глубине материала (см. рис. 1, в), а при определенном сочетании частот и амплитуд будет наблюдаться измельчение с максимальным эффектом. При этом трещины поверхностные и глубинные будут соединяться, создавая разветвленную «сеть» (см. рис. 1, в) и, соответственно, наибольшую степень измельчения, а при их полном замыкании будет наблюдаться наиболее равномерный гранулометрический состав размера b_k частиц после помола. Стоит отметить, что при форме траектории рабочего органа станка, отличающейся от квазикруговой, его движение будет постоянно меняться от равноускоренного до равнозамедленного, что позволит повысить эффективность измельчения хрупких материалов высокоскоростным ударом, провоцирующим повышенное трещинообразование [10]. Важно отметить, что именно сложная форма колебаний исполнительного органа станка обеспечит разнонаправленное, случайным образом, ударное разрушающее воздействие на твердые хрупкие среды независимо от сложности их текстуры, существенно повышая вероятность разрушения среды по опасным ее слоям.

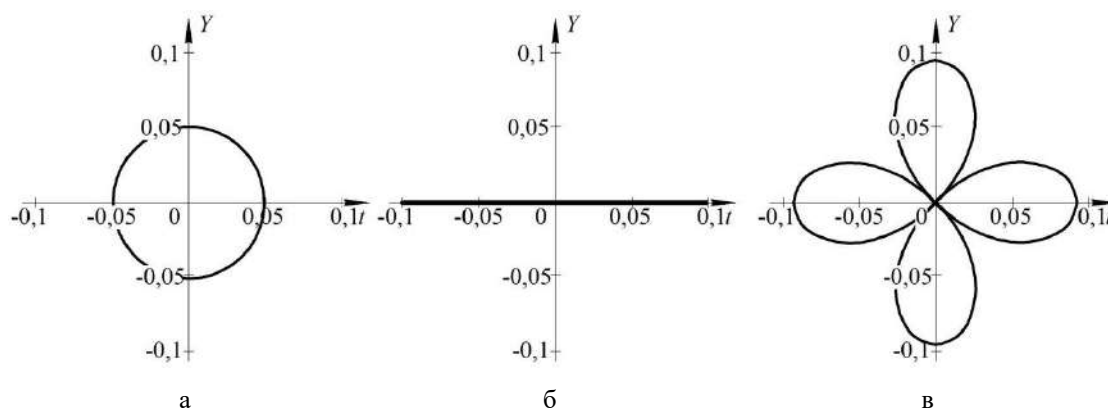


Рис. 3. Формы траекторий колебаний, создаваемых роторно-дебалансным виброприводом: а – окружность, когда одна из частот равна 0; б – прямая, когда амплитуды и частоты равны, колебания антифазны; в – фигура Лиссажу, когда амплитуды равны, а соотношения частот равно 3, колебания антифазны

Fig. 3. Shapes of vibration trajectories generated by a rotor-unbalance vibration drive: а is a circle, when one of the frequencies is 0; б is a straight line, when amplitudes and frequencies are equal, vibrations are antiphase; в is a Lissajous figure, when amplitudes are equal, frequency ratio is 3, and vibrations are antiphase

При разрушении хрупких материалов ударом скорость дробления определяют из условия равенства кинетической энергии, развиваемой ей, работе деформации A_{\max} при сжатии материала:

$$\frac{MV_{\max}^2}{2} = A_{\max}. \quad (12)$$

Из соотношения (12) следует, что чем больше скорость дробления, тем больше совершаемая работа, следовательно, выше производительность. Суммарная максимальная скорость дробления, обеспечиваемая роторно-дебалансным виброприводом, равна

$$V_{\max} = \omega_1 A_1 + \omega_2 A_2 = \omega_2 (r_1 + A_2), \quad (13)$$

которая больше скорости дробления, обеспечиваемой роторным инерционным виброприводом, так как она является составляющей суммарной максимальной скорости V_{\max} роторно-дебалансного вибропривода.

Применение в действующих конструкциях конусных дробилок двух синхронизирующихся роторно-дебалансных виброприводов [12] позволяет значительно расширить технологические возможности данного оборудования: увеличить коэффициент вынуждающей силы, управлять формой колебаний рабочего органа, управлять размерностью измельченного сырья. Это позволит увеличить эффективность оборудования, обеспечивая разрушение материалов с наименьшими усилиями, а следовательно, и затратами энергии. Конструктивно дробилка (рис. 4) выполнена в виде дробящего конуса 1, внутреннего конуса 2 и двух роторно-дебалансных виброприводов 3, каждый из которых состоит из ротора 4 и дебаланса 5. Параметрами колебаний роторно-дебалансных виброприводов управляют по зависимости (11), в связи с тем, что виброприводы связаны между собой упругой связью посредством общего контртела – дробящего конуса 1, который может иметь две степе-

ни подвижности в плоскости, перпендикулярной главным осям инерции роторов 4.

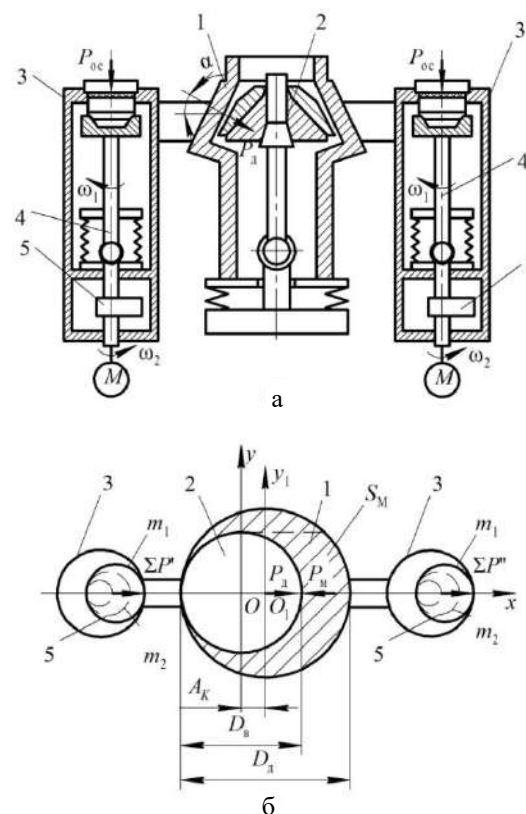


Рис. 4. Конусная инерционная дробилка с самосинхронизирующимся роторно-дебалансным виброприводом: а – кинематическая схема; б – динамическая модель

Fig. 4. An inertial cone crusher with a self-synchronizing rotor-unbalance vibration drive: а is a kinematic scheme; б is a dynamic model

В процессе совместной работы колебания двух роторно-дебалансных виброприводов 3 самопроизвольно синхронизируются [12]. За счет этого в конусной инерционной дробилке генерируется центробежная сила, заставляющая перемещаться дробящий конус 1 при поперечных колебаниях с планетарной обкаткой по внутреннему конусу 2. Причем дробящий конус 1 также приобретает свою центробежную силу. Направление отклонения оси дробящего конуса 1 от оси внутреннего конуса 2 практически совпадает с направлением вектора элемента качения. Поэтому суммарное дробящее усилие развивается не только за счет центробежной силы инерции кинематически неуравновешенных роторов 4 и дебалансов 5, но и за счет центробежной силы, возникающей при прецессионном движении дробящего конуса 1. Параметры данного станка рассчитываются аналогично кинематической модели колебательной системы конусной дробилки с роторными виброприводами [11]:

$$N = \frac{\sum P' + \sum P'' + P_D}{P_M}, \quad (14)$$

где N – коэффициент увеличения нагрузки; $\sum P'$, $\sum P''$ – суммарные центробежные силы кинематически неуравновешенных роторов и дебалансов виброприводов (вынуждающие силы виброприводов),

$$\sum P' = \sum P'' = F_1 + F_2 = m_1 A_1 \omega_1^2 + m_2 A_2 \omega_2^2; \quad (15)$$

P_D – центробежная сила дробящего конуса,

$$P_D = M_D A_K (\omega_1 \pm \omega_2)^2; \quad (16)$$

A_K – амплитуда колебаний центра тяжести дробящего конуса с учетом (11),

$$A_K = A \frac{m_1 + m_2}{M_D + 2(m_1 + m_2)}, \quad (17)$$

где m_1 – масса ротора 1; m_2 – масса дебаланса 5; M_D – масса дробящего конуса;

P_M – сила сопротивления слоя разрушаемого материала,

$$P_M = S_M \sigma_s, \quad (18)$$

где σ_s – предел прочности перерабатываемого материала; S_M – площадь поперечного сечения перерабатываемого материала,

$$S_M = \frac{\pi(D_D + D_B)b_0}{4}, \quad (19)$$

где D_D – диаметр дробящего конуса в среднем сечении; D_B – диаметр внутреннего конуса в среднем сечении; b_0 – размер исходного сырья.

Зависимость между дисперсностью измельчаемых тел и затратами энергии на процесс измельчения принято называть законом измельчения. По закону Кирпичева-Кика [8], энергия, сообщаемая разрушаемому телу

$$\varepsilon = C \ln \left(\frac{S}{S_0} \right), \quad (20)$$

где S_0 и S – удельная поверхность тела до и после измельчения; C – эмпирический коэффициент.

Базируясь на положениях этого закона, принимаем, что формула затрат работы на измельчение

$$A_{\max} = C_1 \lg I_{\text{ст}}^3 + C_2 (I_{\text{ст}} - 1), \quad (21)$$

где C_1 и C_2 – коэффициенты пропорциональности; $I_{\text{ст}}$ – степень измельчения станка, равная

$$I_{\text{ст}} = \frac{b_0}{b_K}, \quad (22)$$

где b_0 и b_K – размеры частиц до и после измельчения.

Поскольку энергия разрушения равна или больше работы A_{\max} деформации при сжатии материала в соответствии с (12), подставляя (21), получаем:

$$\frac{MV_{\max}^2}{2} = C_1 \lg \left(\frac{b_0}{b_K} \right)^3 + C_2 \left(\frac{b_0}{b_K} - 1 \right). \quad (23)$$

Увеличение степени измельчения от увеличения скорости дробления V_{\max} связаны квадратичной зависимостью, а это свидетельствует о значительном повышении эффективности процесса измельчения, поскольку эффективность и определяется, главным образом, степенью измельчения. Из выражения (23) видно, что скорость V_{\max} влияет на размер частиц b_K и зависит от параметров колебаний, а значит, размер частиц измельченного материала регулируется параметрами колебаний, поскольку исходный размер b_0 постоянный.

Для экспериментальной проверки эффективности бесстадийного размерного диспергирования минералов за счет интенсификации трещинообразования путем комплексного низко- и высокочастотного разрушающего воздействия разработан экспериментальный станок (рис. 5), обеспечивающий контроль и управление технологическими параметрами процесса.

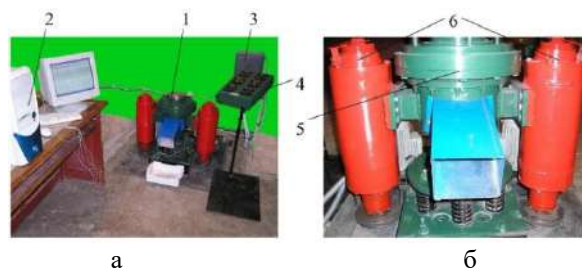


Рис. 5. Станок с компьютерным управлением для размерного диспергирования хрупких материалов: а – общий вид; б – конусная дробилка

Fig. 5. A computer-controlled machine for dimensional dispersion of brittle materials: a is a general view; б is a cone crusher

Станок 1 оснащен компьютером 2, силовым электропитанием 3 и пультом управления 4 (см. **рис. 5, а**). Исполнительный орган станка 5 связан с роторно-дебалансными виброприводами 6 (см. **рис. 5, б**). Во внутренней и внешней связях экспериментальной установки предусмотрены органы управления технологическими параметрами, а также автоматизированная система мониторинга (АСМ) самосинхронизирующихся виброприводов [13]. Для обеспечения стабильного функционирования самосинхронизирующихся виброприводов АСМ через бесконтактные датчики обеспечивает сбор у них параметрической информации, ее автоматическую обработку и подстройку синхронной работы системы посредством интегрированной в нее электрической обратной связи.

На первом этапе экспериментальных исследований определяли частоты и амплитуды колебаний, а

также формы возможных траекторий движений рабочего органа (**рис. 6**) путем совместной обработки осциллограмм с учетом сдвига фаз.

Геометрия сложных траекторий движения дробящего конуса, полученных при компьютерном (см. **рис. 3**) и натурном (см. **рис. 6**) экспериментах, доказывают адекватность математических моделей реальным процессам получения их на станке. Для проверки теоретических предположений экспериментально исследовали колебательный процесс при изменении параметров роторно-дебалансного вибропривода. Сравнение зависимостей частоты (ω_1 и ω_2) и амплитуды (ρ_1 и ρ_2) колебаний роторов от регулируемых параметров вибропривода с соответствующими им теоретическими зависимостями (ω_T и ρ_T) (**рис. 7**) показало хорошую сходимость результатов – не менее 90%.

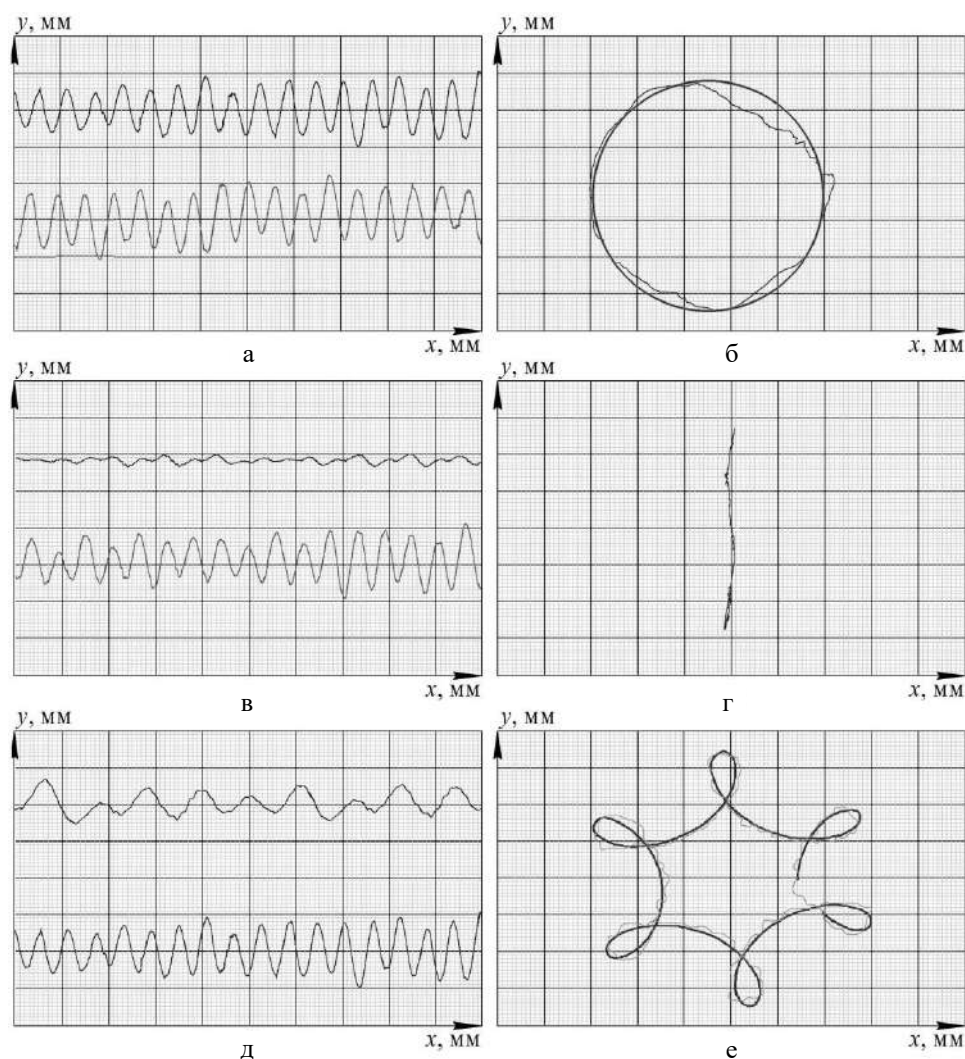


Рис. 6. Осциллограммы и траектории колебательных движений дробящего конуса круговой (а, б), прямолинейной (в, г) и многоугольной (д, е) форм (цена одного деления 0,1 мм)

Fig. 6. Oscillograms and trajectories of vibration motions of the crushing cone: circular (а, б), rectilinear (в, г) and polygonal (д, е) shapes (value of a division is 0.1 mm)

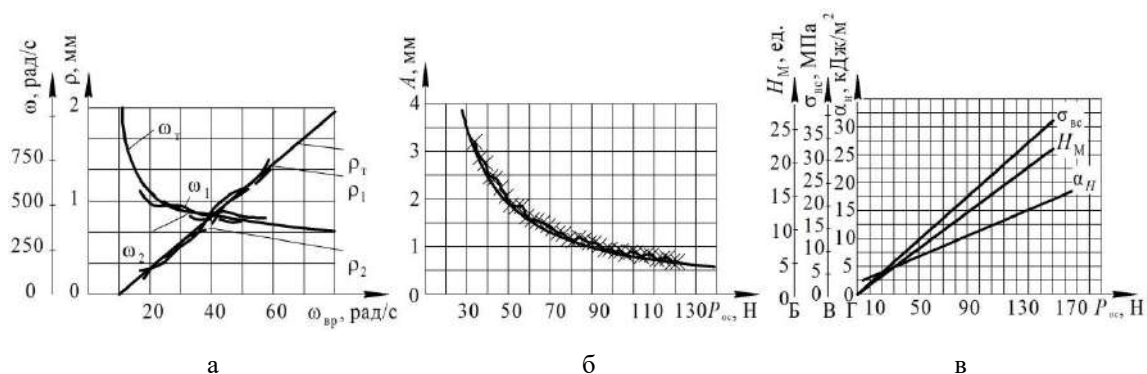


Рис. 7. Экспериментальные и теоретические зависимости амплитуд ρ и частот ω колебаний роторов от изменяемых параметров вибропривода (а), зависимость амплитуды A колебаний дробящего конуса от осевой силы P_{oc} (б) и настроенный график (в)

Fig. 7. Experimental and theoretical dependences between amplitudes ρ and frequencies ω of rotor vibrations and variable parameters of the vibration drive (a), dependence between amplitude A of vibrations of the crushing cone and axial force P_{oc} (б); and an adjusting chart (в)

На втором этапе исследований проверялась эффективность применения роторно-дебалансного вибропривода в станке. При этом оценивались технологические возможности, такие как дробящее усилие и влияние задаваемой формы траектории движения дробящего конуса на производительность и степень измельчения минералов с различными физико-механическими свойствами и актуальных при изготовлении авторских картин из каменной крошки. Одним из самых основных свойств минералов, в том числе и горных пород, является твердость. Для определения относительной твердости минералов применяют минералогическую шкалу твердости Мооса [10].

Но поскольку относительная твердость является только качественно оцениваемой величиной, то она не может быть использована для определения дробящего усилия. Поэтому в качестве механической характеристики минералов были использованы предел прочности при сжатии и ударная вязкость, величины которых были получены путем механических испытаний образцов минералов на разрывной машине и маятниковом копре.

Затем каждый испытуемый минерал измельчали при генерировании круговой (см. рис. 6), прямолинейной и многоугольной траекторий движения исполнительного органа станка. Партию образцов каждого из минералов доводили до начала разрушения, постепенно увеличивая дробящее усилие P_d . При этом фиксировалось минимально необходимое и достаточное значение P_d , а по осциллограмме определяли значения ω и A , соответствующие P_{oc} . Затем рассчитывали суммарную дробящую силу $\Sigma P'$ по формуле (15) и строили графические зависимости $\Sigma P'$ от P_{oc} (на рис. 7 условно не показаны).

Эксперименты показали, что дробление изотропных материалов будет более эффективным, если дробящему конусу задавать квазикруговую траекторию колебательных движений. При помоле минералов с

неявно выраженной анизотропной текстурой целесообразнее всего настраивать эллиптическую траекторию колебательных движений конуса. Для минералов с ярко выраженными анизотропными свойствами, прочность которых в одном из направлений значительно превышает этот показатель в других направлениях, лучше всего обеспечить прямолинейную траекторию ударно-колебательных движений дробящего конуса. Важно отметить, что для дробления любых анизотропных материалов наиболее универсальный и эффективный режим работы данного станка будет при сообщении дробящему конусу более сложной траектории виброперемещений, например многоугольной или даже фигуры Лиссажу. Такая траектория высокочастотных виброперемещений рабочего органа станка в сочетании с низкочастотными позволит наиболее полно реализовать высокоскоростное ударное дробление (80-150 м/с) с дроблением за счет трения (см. рис. 1, в).

На основе сопоставления полученных показателей физико-механических свойств измельченных минералов (твердость H_M по Моосу, предел прочности $\sigma_{вс}$ при сжатии, ударная вязкость α_H) с выявленными зависимостями удалось построить график для настройки станка (рис. 7, в). Этот график позволяет технологу назначать оптимальную дробящую силу для определенного минерала исходя из требуемой осевой силы P_{oc} .

Особый интерес возник у художников-технологов, занимающихся народным художественным промыслом – картинами из каменной крошки. По их заказу на нашей экспериментальной установке были переработаны отходы ценных поделочных камней, полученных из карьеров близлежащего государственного Ильменского заповедника в г. Миассе Челябинской области. По заданию заказчика представленные минералы (10 видов) были переработаны в каменную крошку пофракционно от 0,1 до 8 мм, из

которой и были изготовлены художественные изделия (рис. 8).



Рис. 8. Художественные изделия: а – панно на срезе ствола березы; б – панно из камня

Fig. 8. Products of art: a is an art panel on a cut of a birch tree trunk; б is an art panel made of stone

Заключение

Установлено, что в результате комплексного низ- и высокочастотного вибрационного ударного воздействия на хрупкий материал значительно повышается производительность дробления, а при увеличении дробящей силы – степень дробления материалов. Управление формой траектории движения рабочего органа станка (от простой до сложной кривой) позволяет учитывать физико-механические свойства и текстуру перерабатываемых материалов.

Преимущество конусных инерционных дробилок с роторно-дебалансными виброприводами состоит в том, что они позволяют изменять гранулометрический состав получаемого сырья, поскольку и размер частиц после измельчения и степень измельчения пропорциональны квадрату скорости измельчающего органа. Скорость перемещения последнего пропорциональна частоте и амплитуде колебаний виброприводов, которыми, в свою очередь, и управляют, а сложная форма колебаний исполнительного органа станка позволит совершать ударное разрушающее воздействие на анизотропную среду случайным образом, то есть под разными углами к ее текстуре, как бы стремясь приблизиться к наиболее благоприятной комбинации нормальных и сдвиговых напряжений. Тем самым повышается вероятность более быстрого разрушения среды по опасным слоям и, соответственно, КПД процесса.

За счет совмещения высокочастотных и низкочастотных колебаний в роторно-дебалансных виброприводах сила воздействия измельчающего органа на материал увеличивается пропорционально квадрату суммы частот этих колебаний. За счет этого расширя-

ется область применения такой конусной дробилки, так как такие виброприводы позволяют увеличить степень измельчения материала $I_{ст}$. По этой же причине применение двух самосинхронизирующихся роторно-дебалансных виброприводов увеличивает производительность примерно в 4 раза по сравнению с традиционной конусной дробилкой с одним виброприводом.

Увеличение степени измельчения материала $I_{ст}$ позволяет объединить несколько стадий измельчения материала, так как предыдущие конструкции конусных дробилок применялись только для определенной стадии измельчения – крупной, средней или мелкой.

Список источников

1. Сагдеева Г.С., Патракова Г.Р. Переработка отходов производства и потребления с использованием их ресурсного потенциала // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. №6. С. 194-198.
2. Ivanova I.A., Kolodyazhny S.A., Manokhin M.V. The Problem of Analysis of Environmental Threat Criteria on Asphalt Concrete Plants // Scientific Israel-Technological Advantages. 2012, no. 2, pp. 44-50.
3. Энергетический метод расчета производительности алмазно-канатных машин при добыче облицовочного камня / Г.Д. Першин, М.С. Уляков, Е.Г. Пшеничная, Б.М. Габбасов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14. №2. С. 18-24. DOI: 10.18503/1995-2732-2016-14-2-18-24
4. Song T.-H., Lee S.-H., Kim B. Recycling of crushed stone powder as a partial replacement for silica powder in extruded cement panels // Construction and Building Materials, 2014, vol. 52, pp. 105-115. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.10.060
5. Блехман И.И. Что может вибрация?: О «вибрационной механике» и вибрационной технике. М.: Наука, 1988. 208 с.
6. Sergeev Yu.S., Sergeev S.V., D'yakonov A.A. Increasing geometric homogeneity of dispersed particles of plastic materials produced by vibration assisted micro-cutting // Espacios. 2017, vol. 38, no. 48, p. 36.
7. A nonlinear criterion for triaxial strength of inherently anisotropic rocks / M. Singh, N.K. Samadhiya, A. Kumar, V. Kurnar, B. Singh // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2015, vol. 48, no. 4, pp. 1387-1405. DOI: 10.1007/s00603-015-0708-z
8. Ребиндер П.А., Щукин Е.Д. Поверхностные явления в твердых телах в процессах их деформации и разрушения // Успехи физических наук. 1972. Т. 108. № 9. С. 3-42.
9. Кузбаков Ж.И., Першин Г.Д., Кольга А.Д. Исследование колебаний приводного устройства щековой дробилки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т. 15. №4. С. 73-80. DOI: 10.18503/1995-2732-2017-15-4-73-80

10. Ходаков Г.С. Физика измельчения. М.: Наука, 1972. 307 с.
11. Sergeev S.V., Zakirov R.G. Inertial rotary vibrational drives for crushers of brittle materials // Russian Engineering Research. 2012, vol. 32, no. 2, pp. 130-134. DOI: 10.3103/S1068798X1202027X
12. Пат. 2533743 Российская Федерация, МПК7 В 06 В 1/00. Способ возбуждения колебаний / Ю.С. Сергеев, С.В. Сергеев и др.; заявитель и патентообладатель ООО «Гранулятор». № 2013121307/28; заявл. 07.05.13; опубл. 23.09.14, Бюл. №32. 11 с.
13. Automated monitoring system for self-synchronizing vibration drives / Yu.S. Sergeev, S.V. Sergeev, A.A. Dyakonov, A.V. Kononistov, G.E. Karpov, A.A. Mikryukov // Russian Engineering Research. 2018, vol. 38, iss. 2, pp. 86-90. DOI: 10.3103/S1068798X18020168
1. Sagdeeva G.S., Patrakova G.R. Processing of production and consumption waste using their resource potential. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Herald of Kazan Technological University]. 2014;17(6):194-198. (In Russ.)
2. Ivanova I.A., Kolodyazhny S.A., Manokhin M.V. The problem of analysis of environmental threat criteria on asphalt concrete plants. *Scientific Israel – Technological Advantages*. 2012;(2):44-50.
3. Pershin G.D., Ulyakov M.S., Pshenichnaya E.G., Gabbasov B.M. An energy method for calculating performance of diamond wire machines used for excavating facing stone. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016;14(2):18-24. (In Russ.) DOI: 10.18503/1995-2732-2016-14-2-18-24
4. Song T.-H., Lee S.-H., Kim B. Recycling of crushed stone powder as a partial replacement for silica powder in extruded cement panels. *Construction and Building Materials*. 2014;52:105-115. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.10.060
5. Blekhman I.I. *Chto mozhets vibratsiya? O «vibratsionnoy mekhanike» i vibratsionnoy tekhnike* [What can vibration do? “Vibration mechanics” and vibration technology]. Moscow: Nauka, 1988, 208 p. (In Russ.)
6. Sergeev Yu.S., Sergeev S.V., Dyakonov A.A. Increasing geometric homogeneity of dispersed particles of plastic materials produced by vibration assisted micro-cutting. *Espacios*. 2017;38(48):36.
7. Singh M., Samadhiya N.K., Kumar A., Kurnar V., Singh B. A nonlinear criterion for triaxial strength of inherently anisotropic rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2015;48(4):1387-1405. DOI: 10.1007/s00603-015-0708-z
8. Rebinder P.A., Shchukin E.D. Surface phenomena in solids in the processes of their deformation and destruction. *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Advances in Physical Sciences]. 1972;108(9):3-42. (In Russ.)
9. Kuzbakov Zh.I., Pershin G.D., Kolga A.D. Study on vibrations of the drive device of a jaw crusher. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2017;15(4):73-80. (In Russ.) DOI: 10.18503/1995-2732-2017-15-4-73-80
10. Khodakov G.S. *Fizika izmelcheniya* [Physics of grinding]. Moscow: Nauka, 1972, 307 p. (In Russ.)
11. Sergeev S.V., Zakirov R.G. Inertial rotary vibrational drives for crushers of brittle materials. *Russian Engineering Research*. 2012;32(2):130-134. DOI: 10.3103/S1068798X1202027X
12. Sergeev Yu.S., Sergeev S.V., et al. *Sposob возбуждения колебаний* [Method of excitation of vibrations]. Patent RU, no. 2533743, 2014.
13. Sergeev Yu.S., Sergeev S.V., Dyakonov A.A., Kononistov A.V., Karpov G.E., Mikryukov A.A. Automated monitoring system for self-synchronizing vibration drives. *Russian Engineering Research*. 2018;38(2):86-90. DOI: 10.3103/S1068798X18020168

Поступила 02.11.2023; принята к публикации 23.11.2023; опубликована 25.12.2023
Submitted 02/11/2023; revised 23/11/2023; published 25/12/2023

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

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

Гузеев Виктор Иванович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии автоматизированного машиностроения, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. Email: guzeevvi@susu.ru. ORCID 0000-0002-8277-1217

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

Yury S. Sergeev – PhD (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Electrical Equipment and Industrial Process Automation, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: sergeevys@susu.ru. ORCID 0000-0003-1028-8346

Sergey I. Platov – DrSc (Eng.), Professor, Head of the Department of Machines and Technologies of Metal Forming and Mechanical Engineering,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: mitodim@magtu.ru. ORCID 0000-0002-4868-4881

Viktor I. Guzeev – DrSc (Eng.), Professor, Head of the Department of Automated Mechanical Engineering Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: guzeevvi@susu.ru. ORCID 0000-0002-8277-1217

Sergey V. Sergeev – PhD (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies, Machines and Tools,
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: sergeevsv@susu.ru. ORCID 0000-0001-7868-4295

ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И РЫНОК ПРОДУКЦИИ

ECONOMICS, MANAGEMENT AND PRODUCT MARKET

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 658.562
DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-4-176-183



ОСОБЕННОСТИ РЕИНЖИНИРИНГА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Прыткова Е.А., Давыдов В.М.

Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Россия

Аннотация. Актуальность. В современных условиях промышленные предприятия нашей страны сталкиваются с необходимостью модернизации производственных процессов. Причины этого заключены в необходимости совершенствовать качество продукции, повышать ее технологические и конструктивные параметры и пр. В этой связи, особенно с учетом нестабильности экономической среды, наибольший эффект могут принести мероприятия в рамках технологического реинжиниринга. Анализ литературы показал, что большинство исследователей придают значение реинжинирингу административно-управленческих процессов в современных компаниях, не считая важным трансформацию производственных процессов. Именно это определяет актуальность исследуемой темы. **Цель работы.** В рамках данного исследования целью работы является анализ особенностей организации и проведения реинжиниринга технологических процессов на промышленном предприятии и разработка авторской методологии проведения реинжиниринга технологических процессов. **Используемые методы.** В статье используются общенаучные методы, прежде всего подходы и методы системного анализа и общей теории систем, анализ и синтез, а также сравнения и обобщения. Использование представленных методов позволило провести критический анализ точек зрения на особенности применения иерархических нейросетевых методов в контроле качества. **Новизна.** Представлена авторская методология проведения технологического реинжиниринга на промышленном предприятии. **Результаты.** Необходимость повышения качества изделий приводит к тому, что промышленные предприятия должны проводить технологический реинжиниринг. Ввиду отсутствия на данный момент единой точки зрения на методологию ее проведения была предложена авторская схема алгоритма процесса технологического реинжиниринга на промышленном предприятии. **Практическая значимость.** Результаты работы могут быть использованы на промышленных предприятиях в рамках проведения реинжиниринга с целью повышения качества производимых изделий.

Ключевые слова: реинжиниринг, технологический процесс, промышленное предприятие, качество изделия, риски

© Прыткова Е.А., Давыдов В.М., 2023

Для цитирования

Прыткова Е.А., Давыдов В.М. Особенности реинжиниринга технологических процессов на промышленных предприятиях // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №4. С. 176-183. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-176-183>



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

FEATURES OF REENGINEERING OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AT INDUSTRIAL ENTERPRISES

Prytkova E.A., Davydov V.M.

Pacific National University, Khabarovsk, Russia

Abstract. Relevance. In current conditions, industrial enterprises in Russia face the need to modernize production processes. The reasons are the need to improve the quality of products, increase its technological and design parameters, etc. In this regard, especially factoring into instability of the economic environment, the greatest effect can be brought by measures within the framework of technological reengineering. An analysis of the literature has shown that most researchers attach importance to the reengineering of administrative and management processes in modern companies, considering the transformation of production processes unimportant. This determines the relevance of the topic under study. **Objectives.** This research is aimed at analyzing the features of the organization and implementation of reengineering of technological processes at an industrial enterprise and developing the author's methodology for reengineering of technological processes. **Methods Applied.** The paper describes general scientific methods, primarily approaches and methods of a system analysis and general theory of systems, analysis and synthesis, as well as comparisons and generalizations. The use of the presented methods contributed to conducting a critical analysis of the points of view on the features of the use of hierarchical neural network methods in quality control. **Originality.** The paper presents the author's methodology of technological reengineering at an industrial enterprise. **Result.** The need to improve the quality of products leads to technological reengineering to be carried out at industrial enterprises. Due to the lack of a single point of view on the methodology of its implementation at the current moment, the authors proposed their algorithm of the process of technological reengineering at an industrial enterprise. **Practical Relevance.** The research results can be used at industrial enterprises as part of reengineering to improve the quality of manufactured products.

Keywords: reengineering, technological process, industrial enterprise, product quality, risks

For citation

Prytkova E.A., Davydov V.M. Features of Reengineering of Technological Processes at Industrial Enterprises. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 4, pp. 176-183. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-176-183>

Введение и постановка задачи

Производство конкурентоспособной продукции сегодня стало крайне затруднительно, что связано с фактом несовершенства технической и технологической базы большого количества отечественных промышленных предприятий. Кроме этого, существует проблема неподготовленного персонала и изношенного оборудования. Часть технологий также устарела и приводит к снижению эффективности технологических процессов, а это влияет на экологическую безопасность и приводит к сбоям в производственной деятельности и дальнейшем выпуске продукции невысокого качества с большим количеством брака. Те предприятия, которые в рамках стратегического развития приняли решение выйти из кризисного состояния, не единственные, которые принимают решение выбрать принципы реинжиниринга. Это направление интересует и стабильно работающие предприятия, которые заинтересованы в росте своей прибыли.

Актуальность проблемы, недостаточная разработанность отдельных ее аспектов определили выбор темы, задач исследования.

Методы исследования

В статье используются общенаучные методы и методы математического анализа, прежде всего подходы и методы системного анализа и общей теории систем, анализ и синтез, а также сравнения и обобщения. Использование представленных методов позволило провести критический анализ точек зрения на особенности реинжиниринга технологических процессов на промышленных предприятиях.

Полученные результаты и их обсуждение

Вопрос совершенствования организации производства сегодня стал волновать многие предприятия в связи с постоянно меняющимися условиями отечественной экономики. В качестве одного из направлений, которые могут решить данную задачу, предприятия выбирают создание процессов, которые полностью соответствуют современному уровню развития. В качестве наиболее популярного направления можно выделить реинжиниринг технологических процессов. В данном случае имеется в виду полное изменение производственных процессов, имеющих место на предприятии в данный момент.

Понятие «реинжиниринг» имеет британские кор-

ни, его значение от англ. engineering – разработка, проектирование. В качестве особой деятельности, сущность которой состоит в создании и эксплуатации предприятий, определяют реинжиниринг специалисты Европейской экономической комиссии ООН [5, с. 392]. Усовершенствование объекта или конструкции с целью инновационного развития технологического уровня определяется приставкой ге-. При этом изначально реинжиниринг относили именно к техническим терминам, в то время как сегодня этот термин уже используется и в управленческой науке [10, с. 28].

Инжиниринг и реинжиниринг – это процесс, направленный на создание и совершенствование бизнес-систем. Основное различие между ними заключается в целях, которые они преследуют.

Реинжиниринг отличается от инжиниринга тем, что имеет ту же конечную цель: первый внедряет в производство новейшие достижения научно-технического прогресса, резко улучшая конечный результат производства не за счет традиционных экономических и технологических решений, а за счет инноваций.

Отличия между инжинирингом и особенностями реинжиниринга наглядно представлены на **рис. 1**.

По мнению большого числа исследователей, основной целью реинжиниринга является непосредственно оптимизация производственного процесса, опираясь на те показатели выпуска продукции, которые были запланированы. Не менее важным также является возможность сокращения эксплуатационных расходов за счет трансформации технологий производства, что в итоге приводит к росту качества продукции.

В том случае, когда прогнозы деятельности неблагоприятны, а текущее положение предприятия относится к стабильно удовлетворительному, 27% отечественных и 38% зарубежных предприятий принимают решение о проведении реинжиниринга. В отношении конкурентоспособности, доходности, уровня спроса часто предприятия могут сталкиваться с нежелательными тенденциями. Применение реинжиниринга должно иметь место тогда, когда негативные изменения окружающей обстановки ещё не привели к необратимым последствиям.

Интересно обратить внимание на то, что за рубе-

жом к реинжинирингу обращаются непосредственно предприятия-лидеры в своей нише. Это благополучные и быстрорастущие предприятия, которые ставят своей целью постоянное развитие и совершенствование. Отрыв от своих конкурентов и создание уникальных конкурентных преимуществ – это основная задача при построении цели в ускоренном росте. По мнению ряда экспертов, реинжиниринг в таком случае наиболее подходящий вариант.

Следовательно, повышение уровня конкурентоспособности, рост репутации предприятия – это основные задачи реинжиниринга, которые решаются за счет внесения изменений в технологический процесс предприятия поэтапно. Модернизация и оптимизация мощностей производства, запуск нового оборудования, изменение инфраструктуры – это необходимые этапы планирования. При этом одним из основных условий является тесная взаимосвязь всех указанных пунктов. В таком случае тогда будет достигнут максимальный эффект.

На реинжиниринг оказывают влияние ряд факторов. Они подразделяются на три группы.

Внешние и внутренние факторы – это первая группа. В первую очередь, когда предприятие принимает решение о проведении реинжиниринга, то на это решение влияет ряд факторов извне. Особенность их в том, что предприятие не может оказать влияние на них. С организацией работы предприятия связаны непосредственно внутренние факторы. Отличие внутренних от внешних в том, что они являются результатом управленческих действий самой организации.

Также большое значение имеет вторая группа факторов, так как они непосредственно связаны с условиями функционирования предприятия. Так, к примеру особенности проведения реинжиниринга будут зависеть от таких организационных моментов, как производственная деятельность, экономическое состояние, социальная ситуация.

Третья группа факторов связана непосредственно только с особенностями производственного процесса, в частности, важно знать его тип, основные характеристики и ресурсы, количество задействованных сотрудников и пр.

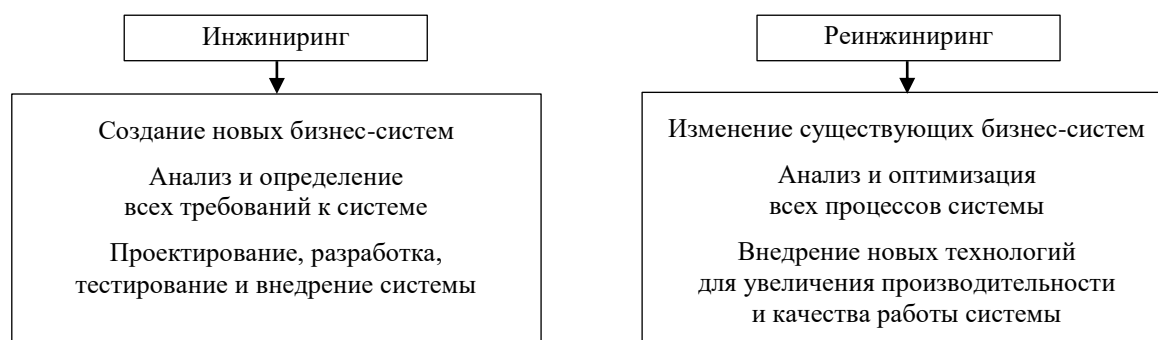


Рис. 1. Отличия инжиниринга и реинжиниринга (составлено авторами)

Fig. 1. Differences between engineering and reengineering (compiled by the authors)

На **рис. 2** представим особенности организации реинжиниринга.

На основании указанных выше особенностей можем сделать вывод о том, что при проведении реинжиниринга необходимо искать возможности снижения рисков, искать необходимые для этого ресурсы и применять специальные методы финансирования проектов.

Проблема с финансами является одной из наиболее часто встречаемых, однако есть и еще ряд проблем, которым необходимо уделять внимание.

Среди них:

1. Недостаток квалифицированного персонала в сфере организации и управления производством, в частности, обратим внимание на то, что на сегодняшний день необходимыми знаниями и навыками в области совершенствования производственных процессов на предприятии до сих пор не обладают большая часть менеджеров высшего и среднего звена.

2. Отсутствие доступа к денежным ресурсам в необходимом количестве для привлечения к работе квалифицированного консультанта.

3. В связи с высокой стоимостью новейших информационных программ многие предприятия не могут себе позволить их приобретение.

4. Процесс реинжиниринга связан с высоким уровнем риска и неопределенностей.

5. Проблемы в организационной культуре на промышленных предприятиях.

6. Высокий уровень сопротивления персонала за счет слабой мотивации.

7. Изношенность производственно-технической базы.

8. Недостаток инвестиций для проведения реинжиниринга на необходимом уровне [4, с. 85].

Кроме того, необходимо обратить внимание на еще одну достаточно значимую проблему, а именно

отсутствие четкой методологической базы, которая бы определяла этапность организации процесса реинжиниринга, особенности инструментария, необходимого для проведения указанного процесса.

То есть в настоящее время отсутствует единый методический подход как к организации реинжиниринга, так и к его проведению.

На **рис. 3** представим схему алгоритма проведения реинжиниринга технологических процессов.

Как видим, алгоритм состоит из нескольких блоков. При этом подготовительный блок – это непосредственно блок оценки текущего состояния технологического процесса.

Немаловажное значение имеет блок внедрения модернизации технологического процесса, который должен включать в себя модернизацию технологического процесса на основании тех проблем, которые были выявлены на начальном этапе.

Модернизация может заключаться в изменении состава производимой продукции, замене оборудования, изменении непосредственно технологии производства, замене ее на более инновационную.

Кроме того, необходима цифровизация технологического регулирования, которая ввиду цифровизации экономики стала неотъемлемой частью повышения качества продукции.

Необходимость выполнения того или иного вида реинжиниринговых мероприятий на уровне технологических процессов с целью повышения его качества и качества выпускаемой на этом этапе продукции определяется следующими критериями:

1. Эффективность функционирования.

2. Соответствие нормативным требованиям.

3. Пригодность к эксплуатации, техническое состояние конструкций и оборудования.

4. Рациональность способов, методов организации и технологии производства работ по затратам труда, срокам и стоимости.

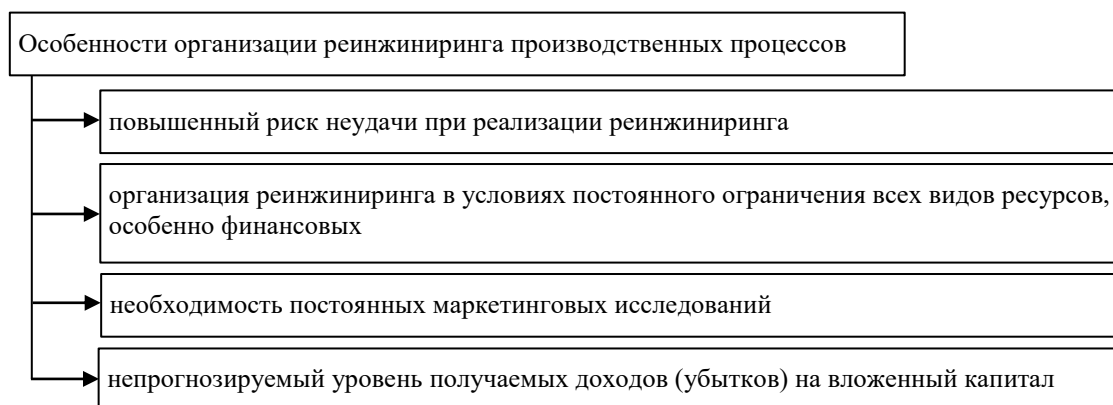


Рис. 2. Особенности организации реинжиниринга производственных процессов (составлено авторами)

Fig. 2. Features of the organization of reengineering of production processes (compiled by the authors)

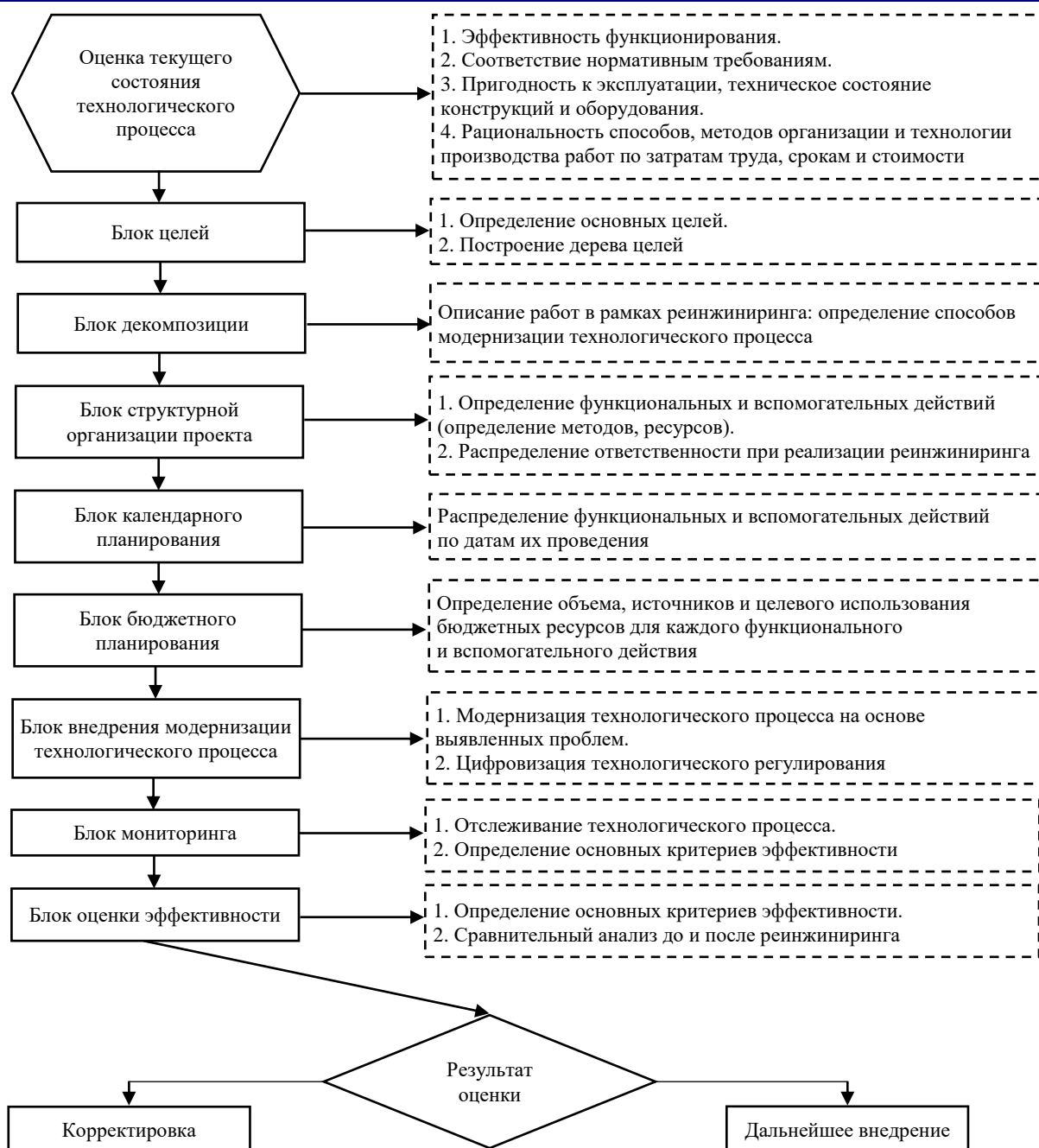


Рис. 3. Алгоритм проведения реинжиниринга технологических процессов (составлено авторами)

Fig. 3. Algorithm for reengineering technological processes (compiled by the authors)

Рассмотрим особенности и методы реализации технологического инжиниринга в условиях современного промышленного предприятия. Последовательно-параллельное внедрение будет наиболее целесообразным. При этом рекомендуется создание проектной группы, которая будет работать на полупостоянной основе. Такая группа позволит повысить эффективность осуществления процесса реинжиниринга. Специалисты в этой группе должны заниматься решением проблем непосредственно в этой сфере. Кроме этого, в группе на временной основе должны быть технические специалисты.

Деятельность группы будет основываться на

принципах профессиональной солидарности. Организация работы всей группы должна возлагаться на тех специалистов, которые разбираются в технологии производственного реинжиниринга. В круг их обязанностей будет входить разработка алгоритмов, технологии внедрения инновационных процессов, создание и руководство работой исследовательских групп, анализ результатов работы и их контроль.

Проектная группа выполняет ряд задач:

- осуществляет координацию работы ее участников в рамках реализации технологического реинжиниринга;

- производит координацию ряда запланированных работ;
- апробирует документальные нововведения в рамках реализуемых процессов;
- проводит обучение специалистов;
- ведет учебно-консультативную работу в среде персонала компании.

В роли руководителя должен быть специалист, обладающий высоким уровнем квалификации непосредственно в вопросах производственного реинжиниринга, разбирается в используемых методиках и инструментах. Данная функция, как правило, возлагается на представителя высшего руководства.

Немаловажным условием, позволяющим повысить эффективность проведения реинжиниринга, будет наличие внешнего консультанта, который уже имел опыт внедрения этого процесса на других предприятиях и обладает необходимыми знаниями относительно возможных рисков и проблем, с которыми может столкнуться группа в процессе проведения реинжиниринга. Такие консультанты обычно выполняют также роль коучей, которые обучают руководство и сотрудников методам проведения реинжиниринга и обеспечивают функциональное руководство участников проектной группы. Такие консультанты в основном выполняют поддерживающую роль. Под руководством консультанта и руководителя проектной группы ее участники осуществляют поэтапное внедрение мероприятий технологического инжиниринга и проводят их апробацию на местах.

Практическая значимость разработанного алгоритма на предприятиях машиностроения сводится к тому, что он дает возможность реализовать ряд конкретных условий успешного реинжиниринга с учетом эффективных принципов менеджмента качества на предприятии. При этом в алгоритме предоставлена возможность определить ресурсы, средства и методы, которые позволят осуществить этапы, принципы и технологию реализации реинжиниринга с минимальными расходами вследствие рационального стратегического планирования реализуемых в проекте мероприятий. Все этапы, а в данном случае блоки детализируются и подкрепляются планом работ в рамках диаграммы Ганта. Каждому блоку присваиваются свои исполнители и ответственные. Это дает возможность руководителю контролировать весь процесс.

Сегодня технологический реинжиниринг является важным направлением в деятельности производственных предприятий. Это связано с ростом запросов потребителей относительно повышения качества продукции и появлению инновационных продуктов. Кроме того, предприятия должны постоянно проводить мониторинг технологических инноваций и переподготовку своего персонала, внедрять инновации [9, с. 17]. Только постоянный мониторинг и оперативное реагирование на запросы текущей реальности позволят производственной компании, в совокупности с технологическим реинжинирингом, остаться на плаву в быстро

изменяющихся экономических условиях и удержать конкурентные позиции.

Заключение

Таким образом, необходимо отметить факт роста актуальности проведения реинжиниринга технологических процессов на промышленных предприятиях. Такая ситуация сложилась ввиду роста конкуренции, устаревании оборудования многих из предприятий. Все это требует повышения качества производимых изделий, которого можно достичь непосредственно в рамках организации и проведения реинжиниринга технологических процессов. Стоит обратить внимание на тот факт, что этот процесс имеет ряд своих особенностей, которые складываются на основании вида деятельности предприятия, а также ввиду отличия технологического процесса от бизнес-процесса. Анализ позволил определить, что на данный момент единой точки зрения на алгоритм проведения данной процедуры нет. На основании этого автором предложен алгоритм проведения реинжиниринга технологических процессов.

Список источников

1. Software solution of reengineering model of technological processes of small enterprises / Milan D. Erić, Miladin Ž. Stefanović, Branko U. Tadić, Slobodan R. Mitrović // The 34th International Conference on Production Engineering, 28-30 September 2011, Niš, Serbia. Niš: University of Niš, Faculty of Mechanical Engineering, 2011. <http://spms.masfak.ni.ac.rs/end/papers/87.%2075-SOFTWARE%20SOLUTION%20OF%20REENGINEERING%20MODEL%20OF%20TECHNOLOGICAL%20PROCESSES%20OF%20SMALL%20ENTERPRISES.doc>
2. Mustafa İncekara. Determinants of process reengineering and waste management as resource efficiency practices and their impact on production cost performance of Small and Medium Enterprises in the manufacturing sector // Journal of Cleaner Production. 2022, vol. 356, 131712. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131712>
3. Реинжиниринг производственных процессов / Бурцев Д.С., Гаврилов Е.С., Изотова А.Г., Литвинова Н.А. СПб.: Университет ИТМО, 2021. 50 с.
4. Гавриков Л.Н., Мельникова Е.В. Синергетический эффект реинжиниринга при внедрении технологических инноваций // Инновации в химико-лесном комплексе: тенденции и перспективы развития: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием / отв. ред. Ю.А. Безруких, Е.В. Мельникова. Красноярск, 2017. С. 84-87.
5. Егоров И.С. Современные методы технологического реинжиниринга на предприятии // Инновационные технологии в электронике и приборостроении: сборник докладов Российской научно-технической конференции с международным участием Физико-технологического института РТУ МИРЭА. Москва, 2020. С. 391-395.

6. Жорова К.А. Технологические процессы организации: понятие, структура и аспекты организации // Сборник статей ежегодной региональной межвузовской научно-практической конференции преподавателей, аспирантов и магистрантов кафедры экономики. Москва, 2021. С. 30-35.
7. Коришонков С.Н. Понятие о производственном и технологическом процессах // Вестник науки. 2019. Т. 3. №3(12). С. 76-79.
8. Ращупкина В.Н. Методология технологического реинжиниринга бизнес-процессов на основе внедрения ERP-системы в условиях инновационной экономики // Инвестиционно-инновационное развитие в условиях цифровизации экономики: стратегии, факторы, механизмы: материалы Круглого стола / под общ. ред. С.В. Беспаловой, Н.В. Шемякиной. Донецк, 2021. С. 207-209.
9. Ридель Л.Н. Системный подход к организации реинжиниринга // Сборник научных трудов по материалам XXXIII Международной научно-практической конференции. Анапа, 2022. С. 16-20.
10. Сборщиков С.Б. Параметры реинжиниринга технологических процессов // Промышленное и гражданское строительство. 2020. №4. С. 28-33.
11. Сборщиков С.Б. Реинжиниринг объектов капитального строительства и реинжиниринг технологических процессов // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. №10. С. 1321-1330.

References

1. Milan D. Erić, Miladin Ž. Stefanović, Branko U. Tadić, Slobodan R. Mitrović. Software solution of reengineering model of technological processes of small enterprises. The 34th International Conference on Production Engineering. Serbia: University of Niš, 2011. Available at: <http://spms.masfak.ni.ac.rs/end/papers/87.%2075-SOFTWARE%20SOLUTION%20OF%20REENGINEERING%20MODEL%20OF%20TECHNOLOGICAL%20PROCESSES%20OF%20SMALL%20ENTERPRISES.doc>
2. Mustafa İncekara. Determinants of process reengineering and waste management as resource efficiency practices and their impact on production cost performance of Small and Medium Enterprises in the manufacturing sector. Journal of Cleaner Production. 2022;356:Article ID 131712. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131712>
3. Burtsev D.S., Gavriluk E.S., Izotova A.G., Litvinova N.A. *Reinzhiniring proizvodstvennykh protsessov* [Reengineering of production processes]. Saint Petersburg: ITMO University, 2021, 50 p. (In Russ.)
4. Gavrikov L.N., Melnikova E.V. Synergetic effect of reengineering in the implementation of technological innovations. *Innovatsii v khimiko-lesnom komplekse: tendentsii i perspektivy razvitiya: materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Innovations in the Chemical and Forestry Complex: Trends and Prospects of Development. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with an International Participation]. Krasnoyarsk: Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 2017, pp. 84-87. (In Russ.)
5. Egorov I.S. Modern methods of technological reengineering at the enterprise. *Innovatsionnye tekhnologii v elektronike i priborostroenii: sbornik dokladov Rossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Innovative Technologies in Electronics and Instrumentation: Proceedings of the Russian Scientific and Technical Conference with an International Participation]. Moscow: Institute of Physics and Technology of MIREA – Russian Technological University, 2020, pp. 391-395. (In Russ.)
6. Zhorova K.A. Technological processes of the organization: concept, structure and aspects of the organization. *Sbornik statei ezhegodnoi regionalnoi mezhvuzovskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii преподавателей, аспирантов и магистрантов кафедры экономики* [Proceedings of the Annual Regional Interuniversity Scientific and Practical Conference of University Teachers, Postgraduate Students and Master's Students of the Department of Economics]. Moscow, 2021, pp. 30-35. (In Russ.)
7. Korishonkov S.N. The concept of production and technological processes. *Vestnik nauki* [Bulletin of Science]. 2019;3(12):76-79. (In Russ.)
8. Rashchupkina V.N. Methodology of technological reengineering of business processes based on the implementation of an ERP system in an innovative economy. *Investitsionno-innovatsionnoe razvitie v usloviyakh tsifrovizatsii ekonomiki: strategii, faktory, mekhanizmy: materialy Kruglogo stola* [Investment and Innovative Development in the Conditions of Digitalization of Economy: Strategies, Factors, Mechanisms. Proceedings of the Round Table]. Donetsk, 2021, pp. 207-209. (In Russ.)
9. Ridel L.N. A system approach to the organization of reengineering. *Sbornik nauchnykh trudov po materialam XXXIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Proceedings of the 33rd International Scientific and Practical Conference]. Anapa, 2022, pp. 16-20. (In Russ.)
10. Sborshchikov S.B. Parameters of reengineering of technological processes. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo* [Industrial and Civil Construction]. 2020;(4):28-33. (In Russ.)
11. Sborshchikov S.B. Reengineering of capital construction facilities and reengineering of technological processes. *Vestnik MGSU* [Vestnik MGSU]. 2019;14(10):1321-1330. (In Russ.)

Поступила 31.03.2023; принята к публикации 12.10.2023; опубликована 25.12.2023
Submitted 31/03/2023; revised 12/10/2023; published 25/12/2023

Прыткова Евгения Андреевна – аспирант, старший преподаватель кафедры технологической информатики и информационных систем, Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Россия. Email: ev-prutkova@mail.ru.

Давыдов Владимир Михайлович – доктор технических наук, профессор кафедры технологической информатики и информационных систем, Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Россия. Email: davellut@mail.ru.

Evgeniya A. Prytkova – postgraduate student, Senior Lecturer, Department of Technological Informatics and Information Systems, Pacific National University, Khabarovsk, Russia. Email: ev-prutkova@mail.ru.

Vladimir M. Davydov – DrSc (Eng.), Professor, Department of Technological Informatics and Information Systems, Pacific National University, Khabarovsk, Russia. Email: davellut@mail.ru.

УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

Мы приглашаем Вас к участию в нашем журнале в качестве авторов, рекламодателей и читателей.

Журнал издается с 2003 г., с 2007 г. включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук. Журнал входит в Перечень по следующим группам научных специальностей:

- 2.5.5. Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки).
- 2.5.6. Технология машиностроения (технические науки).
- 2.5.7. Технологии и машины обработки давлением (технические науки).
- 2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства (технические науки).
- 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки).
- 2.6.2. Металлургия черных, цветных и редких металлов (технические науки).
- 2.6.3. Литейное производство (технические науки).
- 2.6.4. Обработка металлов давлением (технические науки).
- 2.6.5. Порошковая металлургия и композиционные материалы (технические науки).
- 2.6.6. Нанотехнологии и наноматериалы (технические науки).
- 2.8.7. Теоретические основы проектирования горнотехнических систем (технические науки).

Журнал формируется по разделам, отражающим основные направления научной деятельности ученых МГТУ, в частности:

- Разработка полезных ископаемых.
- Металлургия черных, цветных и редких металлов.
- Обработка металлов давлением.
- Литейное производство.
- Технологии обработки материалов.
- Металловедение и термическая обработка металлов.
- Стандартизация, сертификация и управление качеством.
- Моделирование металлургических процессов.
- Новые технологические процессы и оборудование.
- Энергетика металлургии, энергосбережение и электротехнические комплексы.
- Управление, автоматизация и информационные технологии в металлургии.
- Строительные материалы и строительные технологии в металлургии.
- Экология металлургической отрасли.
- Экономика, управление и рынок продукции.
- Стратегия развития, подготовка и обучение специалистов.
- Информация и др.

ТРЕБОВАНИЯ К СТАТЬЯМ, ПРИНИМАЕМЫМ К ПУБЛИКАЦИИ

1. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СТАТЬИ

(на русском и английском языках)

1.1. Наименование статьи (не более 15 слов). Должно кратко отражать содержание статьи. Не рекомендуется использовать сокращения и аббревиатуры.

1.2. Аффiliation. Указывается фамилия, имя, отчество авторов (транслитерация), ученая степень, звание, должность, индивидуальный авторский идентификатор ORCID, полное название организации (ее официально принятый английский вариант), адрес электронной почты хотя бы одного из авторов.

1.3. Аннотация (200-250 слов). Включает постановку задачи (актуальность работы), цель, используемые методы (эксперименты), новизну, результаты, практическую значимость (направления развития).

Онлайн-перевод запрещается!

1.4. Ключевые слова: от 5 до 15 основных терминов.

2. СТРУКТУРА ОСНОВНОЙ ЧАСТИ СТАТЬИ

2.1. Введение (постановка проблемы).

2.2. Теория, материалы и методы исследования, технические и технологические разработки.

2.3. Результаты исследования и их обсуждение.

2.4. Заключение (выводы).

2.5. Список литературы (на русском и английском языках).

3. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЬИ

3.1. Рекомендуемый объем статьи – 8-10 страниц.

3.2. Текст статьи, сведения об авторах, аннотация, ключевые слова и список источников представляются на электронном носителе в виде файла, созданного средствами **Microsoft Word**.

При наборе статьи в **Microsoft Word** рекомендуются следующие установки:

- **шрифт** – **Times New Roman**, размер – 11 пт, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический;
- при вставке **формул** использовать встроенный редактор формул **Microsoft Equation** со стандартными установками, применяется только сквозная нумерация;
- **иллюстрации** не должны превышать ширины колонки (80 мм) или ширины страницы (170 мм). Для подписей элементов на иллюстрации используется шрифт TimesNewRoman 11 пт. Рисунки представляются в редакцию в двух форматах: редактируемом и нередатируемом (*.jpg; качество не менее 300 dpi). В тексте статьи должны быть подрисовочные подписи в местах размещения рисунков. В конце подписи к рисунку точка не ставится. Например:

Рис. 4. Расчётная зависимость $\gamma(t)=I_{n0}/I_{n0}$ от времени и удалённости КЗ от выводов асинхронного двигателя

- **таблицы** нумеруются, если их число более одной. Заголовок необходим, когда таблица имеет самостоятельное значение, без заголовка дают таблицы вспомогательного характера.

3.3. При подготовке рукописи необходимо руководствоваться Международной системой единиц **СИ**.

4. ДОКУМЕНТЫ, ПРИЛАГАЕМЫЕ К СТАТЬЕ

4.1. Заключение о возможности открытого опубликования.

4.2. Договор.

Внимание! Публикация статей является бесплатной. Преимущество опубликования предоставляется авторам и учреждениям, оформившим подписку на журнал.

Статьи проходят обязательное научное рецензирование. Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям.

Телефон: (3519) 22-14-93.

Email: vestnik@magtu.ru; rio_mgtu@mail.ru.