

ВЕСТНИК

Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова

2024. Т.22, №1

Журнал включен в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук. По результатам экспертной оценки ВАК журнал отнесен к категории К1. 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. Колокольцев (Россия)

Т.Н. Александрова (Россия), Ж.-Б. Вогт (Франция),
С.Е. Гавришев (Россия), О.Е. Горлова (Россия),
В.Е. Громов (Россия), Я. Грум (Словения),
И.Г. Гун (Россия), М. Дабала (Италия),
Х. Дья (Польша), Р.О. Дюссан (Индия),
Р. Кавалла (Германия), В.Н. Калмыков (Россия),
Д.Р. Каплунов (Россия), А.Г. Корчунов (Россия),
О.С. Логунова (Россия), Д. Милованович (Сербия),
К. Мори (Япония), И. Мусирин (Малайзия),
А.Б. Найзабеков (Казахстан), Н.Н. Орехова (Россия),
М. Пьетшик (Польша), В.Ф. Рашников (Россия),
Г.А. Роджерсон (Великобритания), В.М. Счастливец (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», 2024

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 28.03.2024. Заказ 60. Тираж 500 экз. Цена свободная.

VESTNIK

of Nosov Magnitogorsk State Technical University

2024. Vol.22, no.1

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

PUBLISHED SINCE MARCH, 2003

EDITORIAL BOARD MEMBERS

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

T.N. Aleksandrova (Russia), M. Dabala' (Italy),
R.O. Dusane (India), H. Dyja (Poland), Ye Feng (China),
S.E. Gavrishev (Russia), O.E. Gorlova (Russia),
V.E. Gromov (Russia), J. Grum (Slovenia), I.G. Gun (Russia),
V.N. Kalmykov (Russia), D.R. Kaplunov (Russia),
R. Kawalla (Germany), V.R. Khramshin (Russia),
A.G. Korchunov (Russia), O.S. Logunova (Russia),
D. Milovanovic (Serbia), K. Mori (Japan),
I. Musirin (Malaysia), A.B. Naizabekov (Kazakhstan),
N.N. Orekhova, M. Pietrzyk (Poland), R. Qin (UK),
V.F. Rashnikov (Russia), G.A. Rogerson (UK),
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, 2024

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: 28.03.2024. Order 60. Circulation: 500. Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ	5
<i>Неугомонов С.С., Зубков А.А., Самигулин В.А., Кутлубаев И.М.</i> Исследование силового взаимодействия усиленного фрикционного анкера со шпуром	5
<i>Першин Г.Д., Пшеничная Е.Г.</i> Механизм квазистатического разрушения объемов горной породы путем распорного воздействия на стенки шпура	13
МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ	20
<i>Зароченцев В.М., Рутковский А.Л., Кондратенко Т.В., Макоева А.К.</i> Блочное-модульное моделирование и исследование бимолекулярного гетерогенного взаимодействия при обжиге сульфида металла.....	20
<i>Якорнов С.А., Мальцев Г.И., Воинков Р.С., Гребнева А.А.</i> Кинетический режим выщелачивания цинка щелочью	29
ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО	39
<i>Гутько Ю.И., Войтенко В.В.</i> Исследование температурных зависимостей физико-технических характеристик песчано-жидкостеклянных литейных стержней	39
ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ.....	49
<i>Сидельников С.Б., Лопатина Е.С., Лопатин В.А., Беляев С.В., Арнаутков А.Д., Дитковская Ю.Д.</i> Исследование технологии получения проволоки технического назначения из нового сплава палладия.....	49
ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ....	61
<i>Генералова А.А., Никулин А.А., Бычков Д.С.</i> Аналитическое исследование характеристик стойкости инструмента и автоколебаний при токарной обработке шкивов	61
<i>Носенко В.А., Кременецкий Л.Л., Коряжкин А.А.</i> Влияние условий глубинного шлифования на морфологию обработанной поверхности титанового сплава	76
<i>Ефремов А.Н.</i> Применение статистических методов для анализа дефектов анодно-окисных покрытий на деформируемых алюминиевых сплавах	88
<i>Кленько С.В., Астащенко В.И., Сафаров Д.Т., Харисов И.Ж., Орлянский В.Е.</i> Повышение циклической долговечности длинномерных стальных деталей машин	98
УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ. СТАНДАРТИЗАЦИЯ. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА	107
<i>Побединский В.В., Полякова М.А., Казанцева Т.В., Казанцева Н.К., Иовлев Г.А.</i> Интеллектуальная система поиска нормативных документов с использованием основных подходов нечеткой логики	107

CONTENTS

SUBSOIL USE	5
<i>Neugomonov S.S., Zubkov A.A., Samigulin V.A., Kutlubaev I.M.</i> Study on Force Interaction between a Reinforced Friction Stabilizer and a Borehole	5
<i>Pershin G.D., Pshenichnaya E.G.</i> Mechanism of Quasi-Static Fracture of Rock Volumes by a Spreading Action on the Borehole Walls.....	13
METALLURGY OF FERROUS, NON-FERROUS AND RARE METALS.....	20
<i>Zarochentsev V.M., Rutkovsky A.L., Kondratenko T.V., Makoeva A.K.</i> Block-Modular Simulation and Study on a Bimolecular Heterogeneous Interaction During Roasting of Metal Sulfide	20
<i>Yakovnov S.A., Maltsev G.I., Voinkov R.S., Grebneva A.A.</i> A Kinetic Mode of Zinc Leaching with Alkali	29
FOUNDRY ENGINEERING.....	39
<i>Gutko Yu.I., Voytenko V.V.</i> Study on Temperature Dependences for Physical and Technical Characteristics of Foundry Sodium Silicate Sand Cores	39
METAL FORMING	49
<i>Sidelnikov S.B., Lopatina E.S., Lopatin V.A., Belyaev S.V., Arnautov A.D., Ditkovskaya Yu.D.</i> Research on the Production Technology for Technical Wire from a New Palladium Alloy	49
MATERIAL PROCESS ENGINEERING.....	61
<i>Generalova A.A., Nikulin A.A., Bychkov D.S.</i> Analytical Study on the Characteristics of Tool Durability and Self-Oscillations During Pulley Turning	61
<i>Nosenko V.A., Kremenetskiĭ L.L., Koryazhkin A.A.</i> The Influence of Creep-Feed Grinding Conditions on the Morphology of the Machined Surface of a Titanium Alloy	76
<i>Efremov A.N.</i> Using Statistical Methods for Analyzing Defects of Anodic Oxide Coatings on Deformable Aluminium Alloys	88
<i>Klenko S.V., Astashchenko V.I., Safarov D.T., Kharisov I.Zh., Orlyansky V.E.</i> Increasing Cyclic Durability of Long-Length Steel Machine Parts	98
PRODUCT QUALITY MANAGEMENT. STANDARDIZATION. INDUSTRIAL MANAGEMENT	107
<i>Pobedinskiy V.V., Polyakova M.A., Kazantseva T.V., Kazantseva N.K., Iovlev G.A.</i> An Intelligent System Based on Main Approaches of Fuzzy Logic for Searching for Regulatory Documents	107

Назаревич С.А., Свириденко А.В.
Модель принятия решений на основе
эмпирических данных..... 114

Третьякова В.А., Горлачева Е.Н.
Разработка методического подхода к оценке
вероятности выигрыша конкурса
с целью планирования загрузки
производственных мощностей..... 122

Пантюхина Е.В., Васин С.А., Пантюхин О.В.
Обеспечение надежного ориентирования
асимметричных деталей формы тел вращения
в дисковых бункерных загрузочно-ориентирующих
устройствах..... 132

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ..... 143

*Сергеев Ю.С., Платов С.И., Гузеев В.И.,
Сергеев С.В., Пузанков М.С.*
Компьютерное моделирование нового способа
управляемого трещинообразования при размерном
дроблении хрупких сред..... 143

Константинов Д.В., Пивоварова К.Г., Песин А.М.
Исследование напряженного состояния
многослойных самозаклинивающихся структур
из кубических элементов на основе
конечно-элементного моделирования..... 156

ЭКОЛОГИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ..... 166

Tsareva S.A., Belov A.V., Tsarev Yu.V.
Development and Implementation of the Environmental
Management System Given the Adaptation
of Resource-Saving Technologies, Using the Example
of the Kogalymenergoneft Service Center..... 166

ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И РЫНОК ПРОДУКЦИИ..... 174

Кузнецова М.В., Зиновьева Е.Г., Селиванов А.С.
Маркетинговый анализ внешней среды
сервисной компании металлургического
предприятия..... 174

СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ, ПОДГОТОВКА И ОБУЧЕНИЕ СПЕЦИАЛИСТОВ..... 185

*Дерябин А.В., Фрейкина И.А., Андреева О.В.,
Налимова М.Н., Грибовский А.В., Шевцова А.Д.*
Стратегические подходы к подготовке
специалистов горно-металлургического комплекса
на основе методик специализированной
двигательной активности..... 185

Nazarevich S.A., Sviridenko A.V.
A Decision-Making Model Based
on Empirical Data..... 114

Tretyakova V.A., Gorlacheva E.N.
The Elaboration of a Methodological Approach
to Estimating the Probability of Winning
a Competition to Plan Production
Capacity Utilization..... 122

Pantukhina E.V., Vasin S.A., Pantukhin O.V.
Ensuring a Reliable Orientation
of Asymmetric Parts of the Form
of Rotation Bodies in Disk Hopper Feeding
and Orienting Devices..... 132

MODELLING OF METALLURGICAL PROCESSES..... 143

*Sergeev Yu.S., Platov S.I., Guzeev V.I.,
Sergeev S.V., Puzankov M.S.*
Computer Modeling of a New Method
of Controlled Cracking During
Dimensional Crushing of Brittle Materials..... 143

Konstantinov D.V., Pivovarova K.G., Pesin A.M.
Fem Study on the Stress
State of Multilayer Self-Interlocking
Structures Made
of Cubic Elements..... 156

INDUSTRIAL ECOLOGY IN METALLURGY..... 166

Царева С.А., Белов А.В., Царев Ю.В.
Разработка и внедрение системы экологического
менеджмента в условиях адаптации
ресурсосберегающих технологий на примере
сервисного центра «Когалымэнергонепфть»..... 166

ECONOMICS, MANAGEMENT AND PRODUCT MARKET..... 174

Kuznetsova M.V., Zinovyeva E.G., Selivanov A.S.
A Marketing Analysis of the External
Environment of a Service Company
of a Metallurgical Enterprise..... 174

DEVELOPMENT STRATEGY, SPECIALIST EDUCATION AND PROFESSIONAL TRAINING.... 185

*Deryabin A.V., Freinkina I.A., Andreeva O.V.,
Nalimova M.N., Gribovsky A.V., Shevtsova A.D.*
Strategic Approaches to Training Specialists
of the Mining and Metallurgical
Complex Based on Methods of Specialized
Motor Activity..... 185



ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УСИЛЕННОГО ФРИКЦИОННОГО АНКЕРА СО ШПУРОМ

Неугомонов С.С.¹, Зубков А.А.¹, Самигулин В.А.², Кутлубаев И.М.²

¹ ООО «УралЭнергоРесурс», Магнитогорск, Россия

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

Аннотация. Актуальность работы. Объемы применения анкеров с фрикционным закреплением имеют четкую тенденцию на увеличение. В настоящее время их доля составляет 31% от общего объема используемых анкерных крепей. При этом расширение области применения и повышение эффективности обеспечивается за счет повышения несущей способности анкера – $F_{ш}$. Повышение достигается за счет использования более качественных сталей или изменения конструкции анкера. Первое направление сопряжено с повышением затрат на изготовление. В связи с этим приоритетным является второе направление. **Постановка задачи.** Разработанная конструкция усиленного фрикционного анкера имеет в головной части вставку из материала с модулем упругости меньше, чем у стержня анкера. Для расчета несущей способности следует сформировать аналитическую модель, учитывающую особенности внесенных изменений. **Новизна.** Силовое взаимодействие, соответствующее конструкции усиленного фрикционного анкера, представлено в виде схемы нагружения, в которой действие усиливающей вставки на изгибающий момент в стержне анкера представлено в виде распределенной нагрузки, значение которой определяется через ее модуль упругости. Принятая схема нагружения учитывает особенности совместного упругого деформирования стенки стержня анкера и вставки. **Результат.** Полученная аналитическая модель позволяет проводить исследования влияния каждого из параметров конструкции на величину нагрузочной способности стержня, установленного в шпур, – $F_{ш}$. **Практическая значимость.** Использование предложенной аналитической модели для расчета несущей способности фрикционных анкеров новой конструкции позволяет обоснованно назначать его параметры при разработке паспортов крепления выработок горных пород.

Ключевые слова: комбинированная анкерная крепь, фрикционный анкер, нагрузочная способность, схема нагружения, аналитическая модель

© Неугомонов С.С., Зубков А.А., Самигулин В.А., Кутлубаев И.М., 2024

Для цитирования

Исследование силового взаимодействия усиленного фрикционного анкера со шпуром / Неугомонов С.С., Зубков А.А., Самигулин В.А., Кутлубаев И.М. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №1. С. 5-12. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-5-12>



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

STUDY ON FORCE INTERACTION BETWEEN A REINFORCED FRICTION STABILIZER AND A BOREHOLE

Neugomonov S.S.¹, Zubkov A.A.¹, Samigulin V.A.², Kutlubaev I.M.²

¹ LLC UralEnergResurs, Magnitogorsk, Russia

² Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Relevance of the study. The volume of using friction stabilizers shows a clear upward trend. Their current share is 31% of the total volume of roof bolts. At the same time, expanding the scope of application and increasing efficiency is ensured by increasing load-bearing capacity of the friction stabilizer F_b . The increase is achieved by using higher quality steels or changing the anchor design. The first option is associated with increased manufacturing costs. In this regard, a priority is given to the second option. **Objective.** The developed design of the reinforced friction stabilizer includes in the head part an insert made of a material, showing less elastic modulus as compared with the stabilizer rod. To calculate load-bearing capacity, an analytical model should be created to factor into the features of the changes made. **Originality.** Force interaction corresponding to the design of the reinforced friction stabilizer is presented in a loading diagram, where the effect of the reinforcing insert on bending moment in the anchor rod is presented as a distributed load, whose value is determined through its elastic modulus. The adopted loading diagram factors into the features of joint elastic deformation of the wall of the anchor rod and the insert. **Result.** The resulting analytical model allows us to study the influence of every design parameter on load-bearing capacity of the rod fixed in a borehole, F_b . **Practical Relevance.** The proposed analytical model used to calculate load-bearing capacity of friction stabilizers of a new design provides us with a rationale for assigning its parameters when developing passports for supporting mine openings.

Keywords: combined anchor support, friction stabilizer, load-bearing capacity, loading diagram, analytical model

For citation

Neugomonov S.S., Zubkov A.A., Samigulin V.A., Kutlubaev I.M. Study on Force Interaction between a Reinforced Friction Stabilizer and a Borehole. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 1, pp. 5-12. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-5-12>

Введение

Технологичность и эффективность применения анкерной крепи существенно увеличилась с переходом на использование анкера в сочетании с армокаркасом – комбинированную анкерную крепь [1-3]. Это позволяет исключить в ряде случаев из технологии установку сетки и полосовых подхватов. При этом применительно к анкерам с фрикционным закреплением обеспечивается совмещение установки анкера и армокаркаса.

Функциональность комбинированной анкерной крепи определяется совокупной работоспособностью ее составляющих – армокаркаса и анкерной крепи.

Армокаркас представляет собой металлическую решетку из переплетенных стержней, выполненных из арматурного профиля и сваренных в точках пересечения [4]. Выполненные исследования показали, что наиболее предпочтительным является армокаркас размерами 950×950 мм при установке одним анкером. Ряд недропользователей используют армокаркасы размером 950×1900 мм и фиксацией двумя анкерами. Выбор размеров армокаркасов обусловлен наиболее предпочтительным шагом анкерования в 1000 мм. Многолетний опыт применения показал, что наиболее прочной является конструкция с непрерывным чере-

дованием положения смежных стержней. Иные варианты, например с односторонним расположением стержней в центральной зоне, обладают меньшей нагрузочной способностью. Это обусловлено тем, что размеры опорной плиты не обеспечивают перекрытие всех точек пересечения стержней в центральной зоне, что ведет к двукратному увеличению расстояния между опорными точками.

Снижение нагрузочной способности и полная потеря функциональности армокаркаса имеет место при отсутствии сварки во всех точках контакта продольных и поперечных стержней (ПМ РФ №223992 «Арматурная сетка для анкерной крепи», опублик. 12.03.2024). Результаты испытаний, проведенных для двух вариантов выполнения армокаркасов с совпадающими параметрами, представлены на **рис. 1** и **2**. Проводились исследования по три образца без сварки в точках пересечения стержней в центральной зоне и со сваркой во всех точках пересечения. Регистрировался ход поршня до 200 мм и создаваемая при этом нагрузка (см. **рис. 2**). Минимальная деформация, обеспечивающая вывод всего армокаркаса в одну плоскость, составляет 125 мм. Для адаптации к профилю вогнутой поверхности необходимая деформация возрастает до 200 мм.

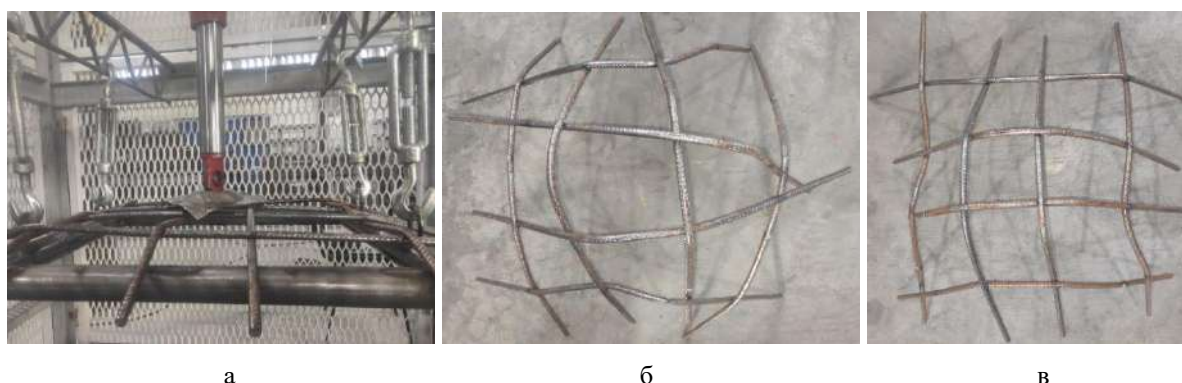


Рис. 1. Испытание армокаркасов: а – общий вид стенда; б – вид армокаркаса без сварки в точках пересечения в центральной зоне; в – вид армокаркаса со сваркой во всех точках пересечения
 Fig. 1. Testing of reinforced frames: a is a general view of the stand; б is the reinforced frame without welding at the intersection points in the central zone; в is the reinforced frame with welding at all intersection points

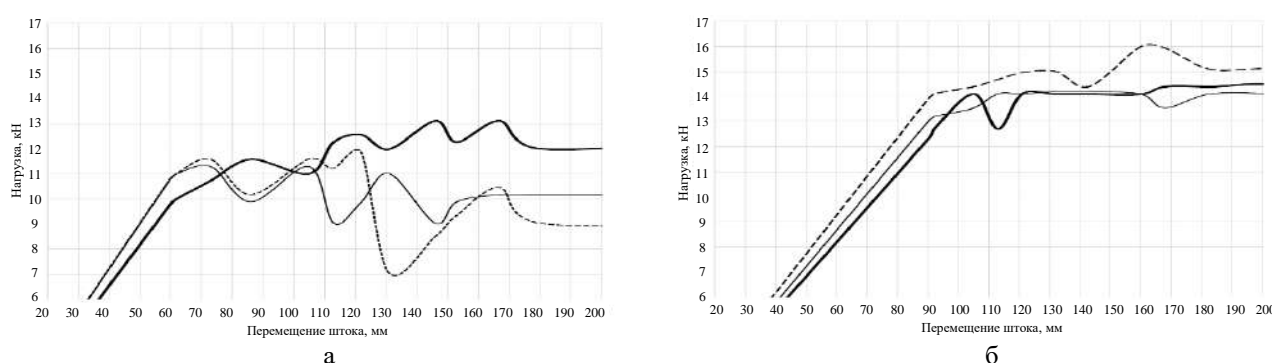


Рис. 2. Результаты испытаний трех образцов армокаркасов при деформации до 200 мм:
 а – без сварки в центральных точках пересечения; б – со сваркой во всех точках пересечения
 Fig. 2. Tests of three samples of armored frames under a deformation of up to 200 mm: a is without welding at the central intersection points; б is welding at all intersection points

Во всех испытанных образцах с неполной сваркой разрушение произошло в четырех сваренных соединениях последовательно при деформации 70-90, 100-120, 130-150, 160-175 мм (рис. 2, а). Центральный квадрат, образованный продольными и поперечными стержнями, деформировался с увеличением размера с исходных 120 до 165-210 мм.

В образцах со сваркой во всех точках разрушение происходило в одном соединении при деформации в 110-120 мм – в первом образце, 130-150 мм – во втором образце, 160-170 – в третьем образце (рис. 2, б). Исходные размеры центрального квадрата при этом не изменялись.

Результаты эксперимента показали недопустимость при изготовлении армокаркасов «экономии на сварке» соединений стержней, предлагаемой некоторыми производителями.

Основной характеристикой анкерной крепи, определенной ГОСТ 31559 – 2012 (Изменения №1, 2), является несущая способность $F_{ш}$. Для анкера с фрикционным закреплением значение $F_{ш}$ установлено не менее 50 кН в скальных породах с пределом прочности на одноосное сжатие 40 МПа. На практике повышение значения несущей способности $F_{ш}$ более

50 кН, определенной ГОСТ 31559 – 2012 позволяет увеличить сетку штангования.

Эксплуатационное значение несущей способности $F_{ш}$ соответствует минимальной величине из трех нагрузочных способностей: упора на стержне анкера, опорной плиты, стержня анкера [5]. Возможности повышения первых двух составляющих определены на сегодня в достаточной степени. Дополнительная опора, формируемая при установке анкера в шпур из концевой части [6], обеспечивает повышение нагрузочной способности упора, выполненного в виде приварного кольца, на 20-25%. Переход на конструкцию, в которой упор формируется из материала анкера [7], обеспечивает значения, близкие к допустимым нагрузкам стержня анкера на растяжение. По результатам испытаний установлено, что такой упор на стержне из стали Ст3, с толщиной стенки 2,5 мм и диаметром 48 мм имеет нагрузочную способность упора 109 кН. При этом допустимая растягивающая нагрузка на стержень не превышает 125 кН. Дополнительное увеличение нагрузочной способности упора может быть получено за счет введения в полость стержня, в зону сформированного упора, усиливающих элементов. Однако в этом случае повышаются затраты на изготовление и усложняется процесс установки анкера в шпур.

Нагрузочная способность опорной плиты с полусферическим куполом и минимальной регламентированной стандартом толщиной в 4 мм близка к нагрузочной способности упора и составляет 108 кН.

Особенности силового взаимодействия усиленного фрикционного анкера и шпура

Наиболее сложным является повышение несущей способности стержня анкера, установленного в шпур, $F_{ш}$. Ее величина определяется силой трения на поверхности сопряжения стержень-шпур. Аналитический расчет $F_{ш}$ применительно к общепринятой конструкции стержня представлен в работе [8]. Установлено, в частности, что определяющим фактором является предел текучести материала стержня σ_T , линейно влияющий на величину $F_{ш}$. Австралийскими специалистами данная зависимость была определена экспериментально. По результатам исследований ими рекомендуется применять стали с пределом текучести 350-400 МПа [9]. Данный подход сопряжен с переходом на легированные марки стали и ведет к увеличению стоимости анкера.

Анализ деформированного состояния стержня анкера, выполненный на макете шпура, выявил особенности взаимодействия стенок анкера и шпура (рис. 3) [8]. Сопряжение поверхностей происходит на части профиля меньше 50%. Зона без контакта определяется углом β и составляет 110-120°. При этом в точках C, C_1, B, B_1 имеет место сосредоточенное действие нагрузок соответственно R_C, R_{C1}, R_B, R_{B1} , а распределенная нагрузка q^* действует только на участке BB_1 .

Увеличение силы трения возможно за счет увеличения зоны сопряжения стенок анкера и шпура. Принципиальное изменение схемы нагружения стержня анкера обеспечивается в новом техническом решении [10]. В переднюю часть стержня анкера с цилиндрическим поперечным сечением устанавливается вставка из материала, имеющего модуль упругости E_B меньше модуля упругости стали (рис. 4, а). При установке в шпур вставка деформируется в радиальном направлении (рис. 4, б), и на всей внутренней поверхности стержня создается распределенное давление q (рис. 4, в).

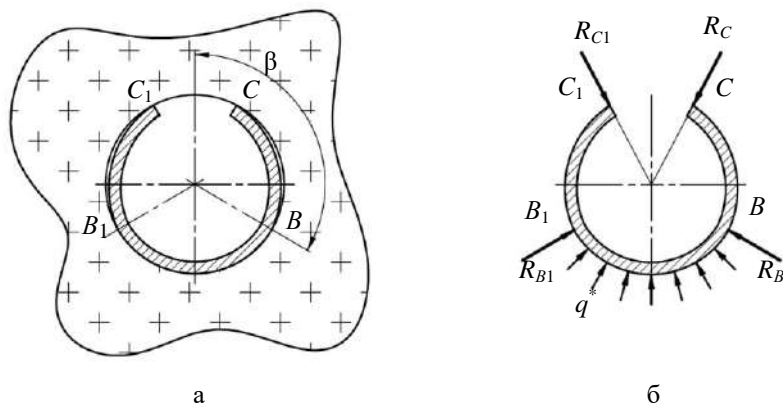


Рис. 3. Поперечное сечение стержня, установленного в шпур (а) и схема нагружения (б)
 Fig. 3. Cross section of a rod installed in the borehole (a) and a loading diagram (б)

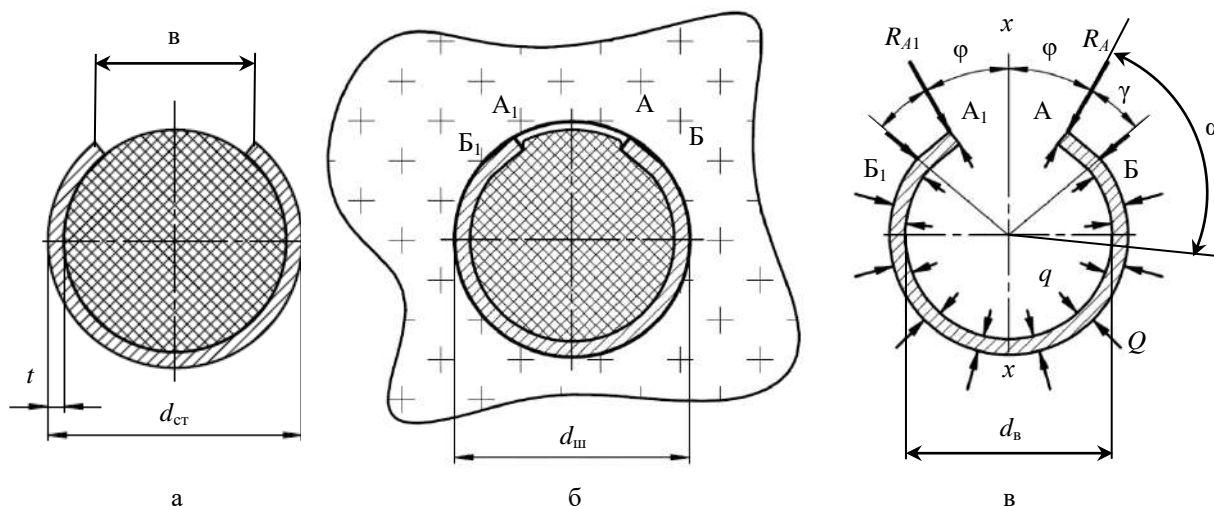


Рис. 4. Поперечное сечение, выполненное в передней части стержня: а – сечение стержня анкера до установки в шпур; б – сечение после установки в шпур; в – схема нагружения стержня анкера
 Fig. 4. Cross section in the head part of the rod: а is a cross section of the anchor rod before installation in the borehole; б is after installation in the borehole; в is a loading diagram of the anchor rod

Аналитическая модель силового взаимодействия усиленный анкер-шпур

Для анализа влияния каждого из параметров стержня анкера и вставки следует иметь аналитическую модель, связывающую их с несущей способностью $F_{ш}$. При ее формировании были приняты следующие допущения:

- материал вставки обладает свойством изотропии в радиальном направлении;
- шпур не деформируется и не разрушается;
- стенки стержня деформируются упруго;
- на участке сопряжения от Б до Б₁ (см. рис. 4, в) внешний диаметр стержня равен диаметру шпура;
- нагружение относительно оси $x - x$ симметрично.

Рассматривается только часть стержня анкера, в пределах которой установлена вставка. В связи с тем, что взаимодействие стержня и шпура по длине неизменно, в дальнейшем исследуется часть стержня протяженностью $l = 1$ мм.

Принятая схема нагружения представлена на рис. 4, в. В точках А и А₁ действуют сосредоточенные силы R_A и R_{A1} . На поверхности стержня распределены нагрузки: на внешней поверхности от точки Б до Б₁ – Q , Н/мм², на внутренней по всему периметру – q , Н/мм².

Исходными параметрами для расчета принимаются:

- $d_{ш}$ – диаметр шпура мм;
- $d_{ст}$ – внешний диаметр стержня, мм;
- $E_{вс}$ – модуль упругости материала вставки, Н/мм²;
- $H_{вс}$ – длина вставки вдоль оси стержня, мм;
- t – толщина стенки стержня, мм;
- $d_{вс}$ – диаметр вставки, мм.

Нагрузочная способность стержня анкера определяется выражением

$$F_{ш} = (Q \cdot l_{II} + 2R_A) \cdot H_{вс} \cdot f_{тр}, \quad (1)$$

где l_{II} – длина линии сопряжения стержня и шпура от Б до Б₁, мм; $f_{тр}$ – коэффициент трения покоя анкер-шпур.

Схема нагружения характеризуется неизвестными: q , Q , R_A .

Распределенная нагрузка q определяется из условия упругой деформации вставки [11].

Опуская промежуточные преобразования, можно записать

$$q = \frac{E_{вс} [d_{вс} - (d_{ш} - 2t)]}{d_{вс}}. \quad (2)$$

На участке ББ₁ имеет место постоянная кривизна, что возможно только при постоянной величине изгибающего момента:

$$M_{ББ_1} = E \cdot J_{xx} \cdot \rho', \quad (3)$$

где E – модуль упругости стержня анкера, Н/мм²; J_{xx} – момент инерции поперечного сечения части стержня, мм²,

$$J_{xx} = \frac{l \cdot t^3}{12}; \quad (4)$$

ρ' – изменение кривизны на участке ББ₁,

$$\rho' = \frac{2(d_{ст} - d_{ш})}{d_{ст} - d_{ш}}. \quad (5)$$

Зависимость (3) применима, если напряжения, возникающие в стенке стержня, не превышают предела текучести σ_T , Н/мм². В противном случае момент следует рассчитывать по формуле

$$M_{ББ_1}^I = \sigma_T \cdot W_{xx}, \quad (6)$$

где W_{xx} – момент сопротивления сечения изгибу, мм³,

$$W_{xx} = \frac{l \cdot t^2}{6}. \quad (7)$$

В произвольном сечении на участке ББ₁, положение которого фиксируется углом α , момент определяется выражением

$$M_{ББ_1} = 0,5R_A \cdot d_{ш} \cdot \sin\alpha + 0,125Q \cdot d_{ш}^2 \cdot \sin^2(\alpha - \gamma) + 0,125Q \cdot d_{ш}^2 [1 - \cos(\alpha - \gamma)]^2 - 0,125q \cdot d_{вс}^2 \cdot \sin^2\alpha - 0,125q \cdot d_{вс}^2 \cdot (1 - \cos\alpha)^2. \quad (8)$$

Преобразовав выражение (8), выделив из него сомножители, содержащие угол α , имеем

$$M_{ББ_1} = \sin\alpha(0,5R_A \cdot d_{ш} - 0,25Q \cdot d_{ш}^2 \cdot \sin\gamma + 0,25q \cdot d_{вс}^2 \cdot \sin\gamma) - \cos\alpha(0,25Q \cdot d_{ш}^2 \cdot \cos\gamma - 0,5q \cdot d_{вс}^2 \cdot \cos\gamma) + (0,25Q \cdot d_{ш}^2 - 0,25q \cdot d_{вс}^2). \quad (9)$$

Значение момента $M_{ББ_1}$ будет постоянным, если первое и второе слагаемые равны нулю:

$$R_A \cdot d_{ш} - 0,5Q \cdot d_{ш}^2 \cdot \sin\gamma + 0,5q \cdot d_{вс}^2 \cdot \sin\gamma = 0; \quad (10)$$

$$0,5Q \cdot d_{ш}^2 \cdot \cos\gamma - q \cdot d_{вс}^2 \cdot \cos\gamma = 0. \quad (11)$$

При этом из третьего слагаемого, равного постоянному моменту $M_{ББ_1}$ (или $M_{ББ_1}^I$), может быть определена величина Q :

$$Q = \frac{4M_{ББ_1} + q \cdot d_{вс}^2}{d_{ш}^2}. \quad (12)$$

Уравнение (10) содержит две неизвестные величины – γ , R_A . Силы R_A и R_{A1} могут действовать как сосредоточенные только в очень крепких породах, с

коэффициентом крепости 15 и более. В менее крепких породах силы будут действовать в пределах некоторых площадок в виде распределенной нагрузки.

Протяженность единичной площадки, выраженная через угол τ (рис. 5, а), будет определяться прочностью породы на одноосное сжатие $\sigma_{сж}$, Н/мм²:

$$\frac{R_A}{l \cdot (\tau \cdot 0,5d_{ш})} \leq \sigma_{сж}. \quad (13)$$

Исходя из этого положения, можно записать

$$R_A = \sigma_{сж} \cdot l \cdot (\tau \cdot 0,5d_{ш}). \quad (14)$$

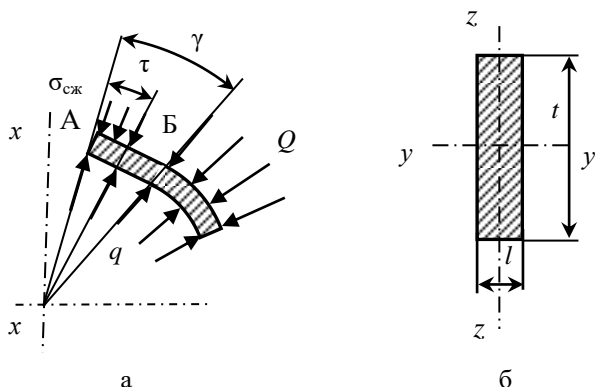


Рис. 5. К анализу нагружения участка АБ: а – схема нагружения; б – параметры поперечного сечения участка единичной длины $l = 1$ мм

Fig. 5. To analyze loading of the АБ section: а is a loading diagram; б is cross-sectional parameters of a section of unit length $l = 1$ mm

При этом угол сопряжения τ не может превышать угол γ (см. рис. 5, а).

Изгибающий момент, выраженный через нагрузки, действующие «слева» от сечения, проходящего через точку Б, имеет вид

$$M_{ББ_1} = \sigma_{сж} \cdot l \cdot (\tau \cdot 0,5d_{ш}) \cdot [0,5d_{ш} \cdot \sin(\gamma - 0,5\tau)] - (0,5d_{вс} \cdot \gamma \cdot q) \cdot (0,5d_{вс} \sin \gamma / 2). \quad (15)$$

Неизвестные углы τ и γ определяются из совместного решения уравнений (10) и (15) после соответствующих подстановок.

Угол ϕ определяется в последнюю очередь путем несложных вычислений по исходным данным и найденным значениям углов.

Экспериментальные исследования

Для подтверждения подхода, использованного в аналитических выкладках, были проведены исследования несущей способности анкеров, установленных в шпуров диаметром 43 мм, выполненные в мраморном блоке (рис. 6, а).

При исследовании использовались укороченные анкеры общей длиной 500 мм (рис. 6, б). Выбор длины обусловлен тем, что при установке длинных анкер

ров ручным инструментом имеет место частичное разрушение шпура. В шпуров, расположенные в непосредственной близости, устанавливались анкеры без вставок и с деревянной вставкой, выполненной из сосны, длиной 200 мм и диаметром 38 мм. Использовались анкеры из Ст20, внешним диаметром 48 мм, толщиной стенки 3 мм. Нагружение анкеров производилось через специальное переходное устройство – штанговывергивателем ПКА – 3 [12].

Результаты исследований представлены в таблице.



а



б



в

Рис. 6. Экспериментальные исследования: а – общий вид блока; б – анкеры до установки в шпур; в – анкеры после изъятия из шпура

Fig. 6. Experimental studies: а is a general view; б is stabilizers before installation in the borehole; в is stabilizers after removal from the borehole

Замеры диаметров стержней анкера со вставкой, извлечённых из шпура, показали, что максимальная разница диаметров в перпендикулярных направлениях составляет не более 0,4 мм.

Зазоров между вставкой и внутренней поверхностью стержня в зоне паза не зафиксировано.

Таблица. Результаты экспериментальных исследований
Table. Experimental studies

Анкер	Диаметр стержня, мм		Несущая способность, Н
	перед установкой	после извлечения из шпура	
Без вставки	47,9	42,9-43,3	31000
Без вставки	48,1	43,0-43,5	32000
Без вставки	48,3	42,8-43,4	31000
Со вставкой	48,0	44,1-44,4	54000
Со вставкой	48,2	44,2-44,6	55000
Со вставкой	48,1	44,4-44,6	53000

Изменение несущей способности (см. таблицу) говорит о том, что установка вставки длиной 200 мм обеспечивает приращение ее значения в среднем 26700 Н.

Аналитический расчет несущей способности усиленного фрикционного анкера

Расчет выполнялся по параметрам стержня, соответствующим проведенному физическому эксперименту. При определении углов использовалось значение $\sigma_{сж}$, равное 75 МПа. При совместном решении уравнений (10) и (15) получены значения углов: $\tau = 5,3^\circ$, $\gamma = 7,2^\circ$. Модуль упругости дерева зависит от совокупности факторов. Для расчетов принято значение 350 МПа. Коэффициент трения сталь-мрамор равен 0,25.

При расчете принятых параметров получено $Q = 7,73 \text{ Н/мм}^2$, $F_{ш} = 45932 \text{ Н}$.

Расхождение расчетной величины $F_{ш}$ с экспериментальными значениями составляет 38%. Это обусловлено тем, что в расчетах использовались справочные значения $f_{тр}$, $\sigma_{сж}$, $E_{вс}$. Для более точного определения значения $F_{ш}$ следует использовать параметры, полученные экспериментально. Получение такой информации на данном этапе достаточно затратно. Исследование следует выполнять на этапах опытно-промышленных испытаний при обосновании технологии крепления конкретных выработок. Следует отметить, что перечисленные параметры влияют на величину $F_{ш}$ линейно, а следовательно, предложенная аналитическая модель позволяет качественно оценивать степень влияния параметров собственно усиленного фрикционного анкера на несущую способность.

Заключение

В работе предложена и экспериментально подтверждена схема взаимодействия усиленного фрикционного анкера и стенок шпура. Установлено:

1. При изготовлении армокаркаса обязательно выполнение сварки во всех точках пересечения стержней.
2. Существенное повышение несущей способности анкера обеспечивается за счет установки в передней части вставки из материала с модулем упругости

меньше, чем у стали.

3. Аналитическая модель расчета несущей способности анкера, полученная на основании инженерного подхода, позволяет оценивать влияние каждого из параметров конструкции усиленного фрикционного анкера на его несущую способность.

Список источников

1. Еременко В.А., Разумов Е.А., Заятдинов Д.Ф. Современные технологии анкерного крепления // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012. №12. С. 38-45.
2. Крепление горных выработок в условиях, деформируемых и удароопасных массивов горных пород / Лушников В.Н., Еременко В.А., Сэнди М.П., Бухер Р. // Горный журнал. 2014. №4. С. 37-44.
3. Совершенствование конструкции и технологии установки крепей с фрикционным закреплением / Зубков А.А., Зубков А.В., Кутлубаев И.М., Латкин В.В. // Горный журнал. 2016. №5. С. 48-52.
4. Пат. 158226 РФ. Секция анкерной крепи / Зубков А.А., Зубков А.Е., Мухамедьярова М.С.; заявл. 06.05.2015, опубл. 27.12.2015. Бюл. №36.
5. Обоснование характеристик анкерных крепей фрикционного типа / Зубков А.А., Калмыков В.Н., Кутлубаев И.М., Найденова М.С. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. №10. С. 35-43.
6. Пат. 95029 РФ. Анкерная крепь / Зубков А.А., Зубков А.Е.; заявл. 25.06.2009, опубл. 25.06.2009. Бюл. №16.
7. Пат. 201514 РФ. Фрикционный анкер / Зубков А.А., Кутлубаев И.М.; заявл. 21.07.2020, опубл. 18.12.2020. Бюл. №35.
8. Zubkov A.A., Kutlubayev I.M., Muhamedjarova M. S. Calculation of Load-bearing Capacity of Tubula Anchor of Friction Type // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing. DOI: 10.1088/1755-1315/272/2/022052
9. Evans D.W. Friction bolt assembly. AU 2016369657 B2, Application Date 09.12.2016/
10. Пат. 220177 РФ. Анкер с фрикционным закреплением / Зубков А.А., Зубков А.А., Неугомонов С.С.,

Ибрагимова Г.Р., Сахаров Е.М.; заявл. 30.08.2023, опубл. 30.08.2023. Бюл. №25.

11. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: учебник для вузов. 8-е изд., стер. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1979. 560 с.
12. Способ и устройство определения несущей способности фрикционных анкеров / Неугомонов С.С., Зубков А.А., Кутлубаев И.М., Кульсаитов Р.В. // Горная Промышленность. 2023. №5. С. 83-87.

References

1. Eremenko V.A., Razumov E.A., Zayatdinov D.F. Modern bolting technologies. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. 2012;(12):38-45. (In Russ.)
2. Lushnikov V.N., Eremenko V.A., Sandy M., Bucher R. Supporting mine openings in deformable and rock-bump hazardous rock massifs. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal]. 2014;(4):37-44. (In Russ.)
3. Zubkov A.A., Zubkov A.V., Kutlubayev I.M., Latkin V.V. Improving the design and technology of installation of supports with friction stabilizers. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal]. 2016;(5):48-52. (In Russ.)
4. Zubkov A.A., Zubkov A.E., Mukhamedyarova M.S. *Sektsiya ankernoi krepki* [Roof bolting section]. Patent RU, no. 158226, 2015.
5. Zubkov A.A., Kalmykov V.N., Kutlubayev I.M., Naidenova M.S. Providing a rationale for characteristics of friction-type anchor supports. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten (nauchno-tekhnichestkii zhurnal)* [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. 2019;(10):35-43. (In Russ.)
6. Zubkov A.A., Zubkov A.E. *Ankernaya krep* [Roof bolting]. Patent RU, no. 95029, 2009.
7. Zubkov A.A., Kutlubayev I.M. *Friktsionnyi anker* [Friction stabilizer]. Patent RU, no. 201514, 2020.
8. Zubkov A.A., Kutlubayev I.M., Muhamedjarova M.S. Calculation of load-bearing capacity of tubula anchor of friction type. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2019, vol. 272, no. 2. Article ID 022052.
9. Evans D.W. Friction bolt assembly. AU 2016369657 B2, 2016.
10. Zubkov A.A., Zubkov Ar.A., Neugomonov S.S., Ibragimova G.R., Sakharov E.M. *Anker s friktsionnym zakrepleniem* [Friction stabilizer]. Patent RU, no. 220177, 2023.
11. Feodosev V.I. *Soprotivlenie materialov: uchebnyk dlya vuzov* [Strength of materials: university textbook]. Moscow: Nauka. Chief Editorial Board of Literature on Physics and Mathematics, 1979, 560 p. (In Russ.)
12. Neugomonov S.S., Zubkov A.A., Kutlubayev I.M., Kulsaitov R.V. Method and equipment for determining the load bearing capacity of friction bolts. *Gornaya promyshlennost* [Russian Mining Industry]. 2023;(5):83-87. (In Russ.)

Поступила 31.10.2023; принята к публикации 21.12.2023; опубликована 28.03.2024
Submitted 31/10/2023; revised 21/12/2023; published 28/03/2024

Неугомонов Сергей Сергеевич – кандидат технических наук, технический директор, ООО «УралЭнергоРесурс», Магнитогорск, Россия.

Зубков Антон Анатольевич – доктор технических наук, генеральный директор, ООО «УралЭнергоРесурс», Магнитогорск, Россия.

Самигулин Вадим Айратович – аспирант, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.

Кутлубаев Ильдар Мухаметович – доктор технических наук, профессор, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: ptmr74@mail.ru. ORCID 0000-0002-1761-4258

Sergey S. Neugomonov – PhD (Eng.), Technical Director, LLC UralEnergResurs, Magnitogorsk, Russia.

Anton A. Zubkov – DrSc (Eng.), General Director, LLC UralEnergResurs, Magnitogorsk, Russia.

Vadim A. Samigulin – postgraduate student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Ildar M. Kutlubayev – DrSc (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: ptmr74@mail.ru. ORCID 0000-0002-1761-4258

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 622.235.1:539.3
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-1-13-19



МЕХАНИЗМ КВАЗИСТАТИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ОБЪЕМОВ ГОРНОЙ ПОРОДЫ ПУТЕМ РАСПОРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СТЕНКИ ШПУРА

Першин Г.Д., Пшеничная Е.Г.

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

Аннотация. Целью работы является разработка методологических основ постановки и решения ряда практически важных задач горного производства через анализ механизма квазихрупкого разрушения твердых тел. При этом решалась задача по определению энергосиловых условий разрыва принятой модели в виде полового цилиндра, нагруженного внутренним давлением, в рамках силового подхода квазистатической теории. Разработанная расчетная схема строилась как трехэтапная, когда на первом этапе исследуется состояние сплошности твердого упругохрупкого тела, а на втором – состояние предразрушения, в котором генерируются (зарождаются) трещины нормального разрыва критической величины, третий этап характеризуется состоянием роста трещин как сквозных, разделяющих кусок породы на отдельные части. Принятие силового подхода в расчетной схеме предопределяет развитие исследований напряженно-деформированного состояния поверхности шпура также по трехэтапной схеме, когда наряду с напряженно-деформированным состоянием с сохранением сплошности определяются дополнительные локальные деформации и напряжения поверхности шпура в связи с раскрытием трещины разрыва. Разработанная методология постановки и решения задачи с позиции механической и физической теорий прочности представляет собой базовую расчетную модель разрушения горной породы, которая является основополагающей для решения ряда практических задач горного производства, так как включает последние достижения прикладной науки о разрушении квазихрупких материалов.

Ключевые слова: квазихрупкое тело, внутришпуровое давление, кинетика трещинообразования, предельное давление разрыва, энергоемкость разрыва

© Першин Г.Д., Пшеничная Е.Г., 2024

Для цитирования

Першин Г.Д., Пшеничная Е.Г. Механизм квазистатического разрушения объемов горной породы путем распорного воздействия на стенки шпура // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №1. С. 13-19. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-13-19>



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

MECHANISM OF QUASI-STATIC FRACTURE OF ROCK VOLUMES BY A SPREADING ACTION ON THE BOREHOLE WALLS

Pershin G.D., Pshenichnaya E.G.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. The research is aimed at developing a methodological framework for setting and solving a number of mining production problems of practical importance by analyzing the mechanism of quasi-brittle fracture of solid bodies. At the same time, the authors solved the problem of determining the energy and force conditions of fracture of the accepted model in the shape of a hollow cylinder loaded with internal pressure as part of the force approach of quasi-static theory. The developed calculation scheme was built as a three-stage one, when at the first stage we studied the state of continuity of an elastic-brittle solid, and at the second stage, the state of pre-fracture, when normal fracture cracks of critical size were generated (nucleated); the third stage was characterized by the state of crack growth as through cracks separating a piece of rock into separate parts. The force approach adopted in the calculation scheme predetermines the development of studies on the stress and strain state of the borehole surface also according to the three-stage scheme, when along with the state of continuity local deformations and stresses of the borehole surface are determined in connection with the opening of fracture cracks. The developed methodology of problem formulation and solution from the position of mechanical and physical theories of strength is a basic calculation model of rock fracture, which is fundamental for solving a number of practical problems of mining, as it includes the latest achievements of applied science on fracture of quasi-brittle materials.

Keywords: quasi-brittle body, intra-borehole pressure, cracking kinetics, ultimate fracture pressure, fracture energy intensity

For citation

Pershin G.D., Pshenichnaya E.G. Mechanism of Quasi-Static Fracture of Rock Volumes by a Spreading Action on the Borehole Walls. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 1, pp. 13-19. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-13-19>

Введение

Способы добычи горных пород, а также природного камня, объединяемые буроразрывающим принципом отделения строчкой шпуров объемов различной крупности от массива, в настоящее время широко применяются, а в случаях высокопрочных пород являются единственно эффективными [1]. Сюда относят такие наиболее распространенные способы, как буроклиновой с применением механических клиньев, гидроклиньев, гидрораскалывающих устройств (ГРУ), невзрывчатых разрушающих смесей (НРС) и буровзрывной.

Шпуровой способ с использованием различных распорных средств, воздействующих на стенки одиночного шпура и таким образом разрывающих объем горной породы нормальными трещинами, применяется с начала зарождения горного производства до настоящего времени [2]. Причиной такого долголетия является низкая трудоемкость и энергоемкость образования трещин нормального разрыва в массиве либо отдельном блоке. Этому способствует природное свойство горных пород разрушаться разрываясь за счет низкого значения предела прочности на растяжение по сравнению с пределом прочности на сжатие. Предел прочности породы на растяжение в 10-15 и более раз ниже, чем прочность на сжатие, что и обуславливает эффективность разрушения, когда при направленном отделении объемов камня прикладываются преимущественно растягивающие напряжения [3].

На практике в процессе добычных работ для направленной отбойки монолитов, блоков камня от массива применяют продольные и поперечные строчки шпуров. Одиночные шпуры применяют в основном для разрушения негабарита [4]. Одиночный шпур является базовым элементом в системе строчки шпуров, где происходит линейная суперпозиция деформаций разрушения от смежных шпуров. Поэтому механизм зарождения и развития трещин вокруг одиночного шпура в результате распорного статического давления на его стенки относится к классической задаче теории квазихрупкого разрушения горных пород. Разделение негабарита в виде блока, монолита неправильной формы на не связанные между собой куски относится к процессам вторичного дробления и обусловлено требованиями безопасности транспортировки из карьера горной массы и технологическими требованиями дробильного производства.

Будем рассматривать случай равномерно-прикладываемого статического давления на стенки шпура по всей его глубине, что достигается применением распорных средств статического действия, например невзрывчатых разрушающих смесей [5]. Напряженно-деформированное состояние в горной породе за стенками шпура (скважины) примем на основе задачи Ляме для толстостенного цилиндра, нагруженного внутренним давлением p , при этом внутренний диаметр цилиндра определяет диаметр шпура $r_{ш}$, а внешний является окружностью радиусом R , описываю-

щей поперечное сечение негабарита. Решение поставленной задачи в соответствии с её основной целью – обоснование механизма разрушения горной породы посредством распорного средства, воздействующего на контур одиночного шпура, – будем рассматривать в квазистатической постановке по трехэтапной схеме расчета [6], когда на первом этапе исследуется состояние сплошности твердого упруго-хрупкого тела, а на втором – состоянии предразрушения, когда зарождаются трещины нормального разрыва до критической величины, третий этап характеризуется состоянием, при котором часть зародышевых трещин развивается по величине до сквозных, разделяющих крупноблочный кусок на отдельные части. При этом конечные расчетные зависимости второго и третьего этапов определяются наличием и проявлением пластических деформаций при разрыве конкретной горной породы согласно концепции разрушения квазихрупкого тела, которую характеризуют такие константы материала, как [7]:

- удельная поверхностная энергия γ_p , Дж/м²;
- комплексный показатель текстурно-структурных свойств $k_{кз}$, $\sqrt{М}$;
- предел прочности на одноосное растяжение σ_p , Па;
- модуль упругости E , Па;
- коэффициент Пуассона μ .

Методология исследования

Напряженно-деформированное состояние (НДС) сплошного упругохрупкого тела для момента, когда возникают условия разрыва на контуре шпура, как следует из работы [8], характеризуется следующими физическими уравнениями (принята цилиндрическая система координат):

$$\sigma_r^{\max} = \sigma_{\text{раз}} = p\chi_n; \quad \sigma_\theta^{\max} = -p; \quad (1)$$

$$\varepsilon_r^{\max} = \varepsilon_{\text{раз}} = \frac{p}{E}(\chi_n + \mu); \quad \varepsilon_\theta^{\max} = -\frac{p}{E}(1 + \mu\chi_n), \quad (2)$$

где p – предельное статическое давление на контуре шпура, обеспечивающее его сплошность, Па; E , μ – модуль упругости и коэффициент Пуассона материала горной породы, Па; $\chi_n = \frac{n^2 + 1}{n^2 - 1}$ – безразмерный геометрический параметр ($n = R/r_{\text{ш}}$).

Относительный параметр n определяет в модели полого цилиндра при заданном значении $r = r_{\text{ш}}$ толщину его стенки.

Уравнения системы (1) дают возможность для условий совместного действия сжимающих и растягивающих напряжений на основе энергетической теории прочности для сплошного тела определять максимальные разрывающие напряжения на контуре шпура в зависимости от параметра χ_n , который, в свою очередь, является функцией параметра n :

$$\sigma_{\text{экв}} = \sigma_p = p\sqrt{\chi_n^2 + \chi_n + 1}. \quad (3)$$

На рисунке в графическом виде приведена зависимость (3) влияния в модели полого цилиндра безразмерного показателя n на предельное разрывающее контур шпура напряжение по отношению к внешней нагрузке. Анализ системы уравнений (1) и графической зависимости рисунка показывает, что при $n \rightarrow 1$, то есть при толщине стенки, стремящейся к нулю, окружное растягивающее напряжение σ_t асимптотически стремится к бесконечности, а при $n \geq (4 - 5)$ параметр $\chi_n \rightarrow 1$, что соответствует случаю чистого сдвига материала горной породы, когда окружное напряжение σ_t равно радиальному σ_r . В этом случае уравнение (3) преобразуется до вида $\sigma_p = \sqrt{3}p$, что дает возможность на контуре шпура определить взаимосвязь предельных значений внешней нагрузки p и разрывной прочности деформируемого материала σ_p для крупноблочных отдельностей горной породы.

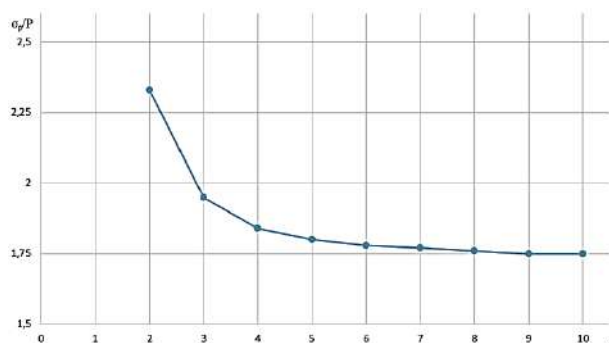


Рисунок. Зависимость относительного предельного напряжения разрыва на контуре шпура от параметра n , характеризующего толщину стенки в модели полого цилиндра

Figure. Dependence between relative ultimate fracture stress on the borehole contour and parameter n characterizing wall thickness in a hollow cylinder model

Очевидно, что эквивалентное напряжение (3) на контуре шпура, достигшее предельного напряжения разрыва материала горной породы σ_p , определяет критическое давление в шпуре $p = p_c$, при котором создаётся предельное НДС, когда упругохрупкое тело ещё сохраняет свою целостность, то есть сплошность. Предельное состояние сплошности материала горной породы с позиции классической теории прочности характеризуется также коэффициентом концентрации напряжений, который определяется на контуре шпура как относительное превышение предела прочности на одноосное растяжение σ_p по сравнению с внешней нагрузкой $K_\sigma = \frac{\sigma_p}{p_c} = \sqrt{3}$.

Отмеченные предельные показатели НДС (1)-(3), полученные на основе механики твердого тела, характеризуют первый этап расчетной схемы, когда деформируемое тело еще сохраняет целостность в

местах локальной концентрации напряжений, которые при дальнейшем нагружении являются источником образования зародышевых трещин.

Методическую основу второго и третьего этапов расчетной схемы квазистатического разрушения упруго хрупких материалов составляет рассмотрение процесса образования зародышевых трещин и их развития до предельных значений, разрывающих твердое тело на отдельные, не связанные между собой части. При этом данный процесс характеризуется количественными показателями, которые устанавливаются путем аналитического обоснования числа зародышевых трещин и их количества, получивших развитие в качестве сквозных.

Детальный анализ второго этапа расчетной схемы как этапа предразрушения проведен в работе [6], где на основе задачи Ляме, рассматривающей предельное равновесие полого цилиндра, моделирующего некоторый объем твердого тела, деформированного равномерно распределенным шпуровым давлением распорных средств, были получены следующие, полностью характеризующие данный этап энергосиловые показатели и параметры:

– характерный размер зоны предразрушения, определяемый в виде равенства длины зародышевой трещины разрыва на поверхности шпура его радиусу:

$$l_{\text{тр.з.}} = r_{\text{ш}};$$

– предельная (критическая) нагрузка ρ_k , по достижении которой наступает локальный разрыв:

$$\rho_k = \frac{k_k}{\sqrt{\pi r_{\text{ш}}}}; \quad (4)$$

– удельная энергия, которую необходимо затратить на образование единицы поверхности разрыва критической величины:

$$\gamma = k_k^2 \frac{\sigma_p^2}{2E}; \quad (5)$$

– число зародышевых трещин в зоне предразрушения:

$$n_{\text{тр.з.}} = 2\sqrt{2}(1 + \mu). \quad (6)$$

На третьем этапе расчетной схемы окончательно устанавливаются искомые показатели и параметры как предельные величины процесса разрыва исследуемой модели, а именно [6]:

– взаимосвязь удельных поверхностных энергий, характеризующих зоны развития как зародышевых (критических), так и сквозных трещин нормального разрыва:

$$e_\gamma = \frac{\gamma}{\gamma_p} = \frac{2}{n^2 - 2}, \quad (7)$$

– удельную поверхностную энергию, которую необходимо затратить на разделение объема куска горной породы на отдельные части:

$$\gamma_p = \frac{\gamma}{e_\gamma} = k_k^2 \cdot \frac{\sigma_p^2}{2E} \cdot \frac{n^2 - 2}{2}, \quad (8)$$

– число сквозных трещин нормального разрыва:

$$n_{\text{тр.с.}} = n_{\text{тр.з.}} \frac{\chi}{\sqrt{2}} = 2\chi(1 + \mu), \quad (9)$$

где e_γ – энергетический коэффициент полезного действия (КПД) процесса нормального разрыва квазихрупких материалов.

На основе полученных энергосиловых показателей и параметров, характеризующих все три взаимосвязанных этапа расчетной схемы, в работе [6] формулируется и составляется энергетический баланс необратимо затраченной работы при разрушении квазихрупких материалов. Разработанный энергетический подход позволил определить предельное шпуровое давление как разрывающую кусок породы нагрузку и зависимость от её величины удельную работу разрушения распорного средства. При этом надо отметить, что энергетический баланс составлен без учета деформаций раскрытия трещин от локального разрыва поверхности шпура, то есть практически на базе напряженно-деформированного состояния сплошного твердого тела. Для более корректного расчета энергосиловых показателей необходимо учитывать локальные деформации разрыва в области шпура, так как они увеличивают необходимое распорное воздействие на стенки шпура по объемному расширению, которое обеспечит работу разрыва, соответствующую размерам куска и его физико-механическим свойствам. В этом случае энергетическая эффективность распорного средства должна соответствовать его деформационно-силовым показателям, когда гарантированно произойдет разрыв куска на части.

Поставленная цель достигается в рамках общего подхода линейной теории разрушения квазихрупких материалов на основе решения задачи по определению удельной энергии разрыва куска породы на отдельные части распорными средствами через одиночный шпур по следующей зависимости [9]:

$$\Xi = \frac{1}{2} \sigma_{\text{раз}} \cdot \varepsilon_z = \frac{1}{2} \chi_n \cdot \rho_p \cdot \varepsilon_\Sigma, \quad (10)$$

где $\sigma_{\text{раз}}$ – напряжение разрыва куска породы, Па; ρ_p – внутришпуровое предельное давление, Па; ε_Σ – предельная деформация разрыва на стенке шпура с учетом раскрытия трещины разрыва.

Внутришпуровое предельное давление рассчитаем путем использования квазистатического силового условия согласно работе [10]:

$$\rho_p = \rho_k \sqrt{\frac{l_{тр}/l_k}{e_\gamma} + 1}, \quad (11)$$

где $l_{тр} = r_{ш}(n - 1)$ – длина сквозной трещины, м; $l_k = r_{ш}$ – длина критической (зародышевой) трещины, м.

Подстановка в (11) значений $l_{тр}$, l_k и величины энергетического КПД разрыва согласно выражения (7) дает окончательную зависимость для нахождения искомой величины силового показателя:

$$\rho_p = \rho_k \sqrt{(n-1) \cdot \frac{n^2 - 2}{2} + 1}. \quad (12)$$

Для расчета предельной упругой деформации начала разрыва стенки шпура и раскрытия трещины за счет взаимного смещения её берегов по мере прорастания до критической величины $l_{тр.к.}$ обратимся к выражению деформации растяжения периметра поверхности шпура (2) и на его основе, согласно работе [6], рассмотрим состояние перехода (П-состояние) от сплошности твердого тела (С-состояние) к его разрушению путем разрыва (Р-состояние). Переходное состояние как состояние предразрушения характеризуется следующими показателями и параметрами: $n = 2$; $\chi_k = 5/3$; $l_{тр.к.} = r_{ш}$, при этом зарождение трещины разрыва происходит при шпуровом давлении $\rho = \rho_k$, а развитие до критической величины при давлении $\rho = \sqrt{2}\rho_k$. С учетом отмеченных характеристик и силовых условий П-состояния деформация зарождения разрыва поверхности шпура как критическая величина перехода из С-состояния в П-состояние принимает вид

$$\varepsilon_k = \frac{\chi_k + \mu}{E} \rho_k, \quad (13)$$

а деформация развития трещины до критической величины

$$\varepsilon_{р.к.} = \frac{\chi_k + \mu}{E} \sqrt{2} \rho_k. \quad (14)$$

Так как зависимость (14) включает и деформацию растяжения контура шпура (13), то очевидно, что развитие трещины до критической величины и её раскрытие будет характеризовать деформационный показатель

$$\delta_k = \varepsilon_{р.к.} - \varepsilon_k = \frac{\chi_k + \mu}{E} \cdot \rho_k \cdot (\sqrt{2} - 1) = k_\delta \cdot \varepsilon_k. \quad (15)$$

В принятой расчетной схеме НДС на контуре шпура использована линейная модель деформации раскрытия трещины разрыва δ от внешней распорной нагрузки ρ . В этом случае определим взаимосвязь между показателями НДС как для сплошного состояния контура, так и при наличии на нем техногенных трещин разрыва, для чего рассмотрим на основе гео-

метрического анализа прямоугольных треугольников O_1AB и O_1DC следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha_1 &= \frac{\sigma_p - \sigma_k}{\varepsilon_p - \varepsilon_k} = \frac{\chi_n \rho_p - \chi_k \rho_k}{\varepsilon_p - \varepsilon_k} = E_c; \\ \operatorname{tg} \alpha_2 &= \frac{\sigma_p - \sigma_k}{(\varepsilon_p - \varepsilon_k) + \delta_p} = \frac{\chi_n \rho_p - \chi_k \rho_k}{(\varepsilon_p - \varepsilon_k) + \delta_p} = E_{тр}, \end{aligned} \quad (16)$$

где E_c , $E_{тр}$ – модули упругости материала горной породы в сплошном состоянии и при наличии на контуре шпура трещин, Па; δ_p – деформация раскрытия сквозной трещины.

Совместное решение уравнений (16) дает

$$\delta_p = (\varepsilon_p - \varepsilon_k) \left(\frac{E_c}{E_{тр}} - 1 \right) = (\varepsilon_p - \varepsilon_k) k_\delta, \quad (17)$$

где $k_\delta = \sqrt{2} - 1$; $E_{тр} = \frac{E_c}{\sqrt{2}}$.

Полученная зависимость (17) является основополагающим деформационным условием квазистатики хрупких материалов, так как отражает взаимосвязь физических констант в сплошном и нарушенном техногенными трещинами состояниях. Физическое значение коэффициента пропорциональности k_δ заключается в том, что он отражает изменение (снижение) модуля упругости E_c сплошного состояния по сравнению с состояниями, в которых зарождаются трещины разрыва и прорастают вплоть до сквозных.

Результаты в форме (11)-(17) позволяют раскрыть зависимость (10) в виде функционально связанных между собой следующих слагаемых:

$$\Theta = \frac{1}{2} \sigma_{раз} \cdot \varepsilon_p + \frac{1}{2} (\sigma_{раз} - \sigma_k) \delta_p + \sigma_k \delta_p. \quad (18)$$

Подстановка в (18) квазистатического деформационного условия (17) приводит к выражению

$$\begin{aligned} \Theta &= \frac{1}{2} \sigma_{раз} \cdot \varepsilon_p (1 + k_\delta) \times \\ &\times \left[1 - \frac{\varepsilon_k}{\varepsilon_p} \frac{k_\delta}{(1 + k_\delta)} + \frac{\sigma_k}{\sigma_{раз}} \frac{k_\delta}{(1 + k_\delta)} \left(1 - \frac{\varepsilon_k}{\varepsilon_p} \right) \right]. \end{aligned} \quad (19)$$

Переход в уравнение (19) от НДС на контуре шпура (σ , ε) к распорной нагрузке (ρ) произведём с помощью зависимостей (1) и (2), что даёт

$$\Theta = \frac{1}{2} \frac{\rho_p^2}{E} \chi_n (\chi_n + \mu) (1 + k_\delta) \left[1 + A_1 \frac{\rho_k}{\rho_p} - A_2 \left(\frac{\rho_k}{\rho_p} \right)^2 \right], \quad (20)$$

где $A_1 = \left[\frac{\chi_k}{\chi_n} - \frac{\chi_k + \mu}{\chi_n + \mu} \right] \cdot \frac{k_\delta}{1 + k_\delta}$; $A_2 = \frac{\chi_k}{\chi_n} \cdot \frac{\chi_k + \mu}{\chi_n + \mu} \cdot \frac{k_s}{(1 + k_s)}$.

С целью упрощения полученной зависимости (20) численно проанализируем слагаемые множителя в квадратных скобках по отношению к единице, для чего рассмотрим случай, когда $n = 5$, что даёт $\chi_n = 26/24 = 1,08$ и согласно (12) $\rho_k/\rho_p = 0,15$, $(\rho_k/\rho_p)^2 = 0,02$, при этом принимаем: $\mu = 0,2$; $\chi_n = 5/3 = 1,67$; $k_\delta = 0,41$. Конкретный расчет показывает: $[1 + 0,038 - 0,013] = 0,99$. Численные результаты дают основание принять множитель в квадратных скобках равным единице, а это существенно упрощает аналитический вид искомой энергетической зависимости:

$$\Theta = \frac{1}{2} \chi_n \cdot (\chi_n + \mu) \cdot (1 + k_\delta) \cdot \frac{\rho_p^2}{E_c} \sqrt{2}. \quad (21)$$

Зависимость (21) определяет минимальное значение удельной объемной энергоёмкости, при которой рассматриваемая единичная отдельность горной породы разрывается на две равные части, так как в этом случае степень дробления также минимальна [11].

Результаты исследований и их обсуждение

Логическим завершением данных исследований является сравнение их конечных результатов, полученных в виде зависимости (21) с аналогичным показателем работы [6]:

$$\alpha = \frac{3n^2 + 1}{3(n^2 - 1)} \cdot (1 + \mu) \cdot \frac{\rho_p^2}{E_c}. \quad (22)$$

Относительная аналитическая оценка (21) и (22) показывает, что

$$\frac{\Theta}{\alpha} = \frac{3}{\sqrt{2}} \cdot \frac{n^2 - 1}{3n^2 + 1} \cdot \frac{(\chi_n + \mu) \cdot (1 + k_\delta) \cdot \chi_n}{1 + \mu}, \quad (23)$$

а численные расчеты при $\mu = 0,2$ дают:

$$n = 3, \frac{\Theta}{\alpha} = 1,91; n = 4, \frac{\Theta}{\alpha} = 1,15; n = 5, \frac{\Theta}{\alpha} = 1,09;$$

$$n = 6, \frac{\Theta}{\alpha} = 1,07; n = 10, \frac{\Theta}{\alpha} = 1,02.$$

Выводы

Разработана и предложена методика инженерных расчетов энергосиловых показателей процесса разрушения крупноблочных отдельностей горной породы посредством одиночного шпура, на контур которого статически воздействует распорное средство. Результаты исследований основаны на теории квазистатического разрушения упругохрупких материалов и включают силовой подход, когда расчетная схема базируется на оценке НДС контура шпура в зависимости от его состояния в процессе возникновения и развития трещин нормального разрыва.

Полученное в данной работе решение сравнивается с аналогичной зависимостью, но определенной ав-

торами на основе энергетического подхода. Сравнение указывает на эквивалентность энергетического и силового подходов при определении показателей процесса разрушения горных пород шпуровым способом, несмотря на существенное различие в постановке рассматриваемой задачи и принятых расчетных схем.

Совместные результаты анализируемых работ, дополняя друг друга с позиции механической и физической теории прочности, представляют собой базовую расчетную модель разрушения горной породы, которая является основополагающей для решения ряда практических статических и динамических задач горного производства, так как включает последние достижения прикладной науки о разрушении квазихрупких материалов.

Список источников

1. Першин Г.Д., Караулов Н.Г., Уляков М.С. Современные технологические схемы добычи блочного высокопрочного камня // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №3. С. 5-11.
2. Алимов О.Д., Мамасаидов М.Т. Технические средства отделения блоков камня от массива. Фрунзе: Илим, 1987. 216 с.
3. Карасев Ю.Г., Бакка Н.Т. Природный камень. Добыча. Добыча блочного и стенового камня. СПб.: Санкт-Петербургский горный институт, 1997. 428 с.
4. Першин Г.Д., Уляков М.С. Обоснование способов подготовки к выемке блочного природного камня высокой прочности // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2010. №4. С. 14-19.
5. Пшеничная Е.Г. Обоснование рациональных параметров технологии добычи гранитных блоков с применением невзрывчатых разрушающих средств: дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск, 2006. 167 с.
6. Першин Г.Д., Пшеничная Е.Г. Решение задачи Ляме в квазихрупкой постановке для обоснования модели расчета разрушения горных пород шпуровым способом // Горный журнал. Изв. вузов. 2023. №3. С. 53-63.
7. Першин Г.Д., Пшеничная Е.Г. Концепция квазихрупкого разрушения горных пород применительно к процессам их добычи и первичной переработки // Горный журнал. Изв. вузов. 2022. №4. С. 64-75.
8. Першин Г.Д., Пшеничная Е.Г. Основы расчета технологических параметров добычи природного камня с применением НДС // Добыча, обработка и применение природного камня: сб. науч. тр. / под ред. Г.Д. Першина. Магнитогорск: Изд-во МГТУ им. Г.И. Носова, 2001. Вып. 1. С. 77-94.
9. Латышев О.Г. Разрушение горных пород. М.: Теплотехник, 2007. 660 с.
10. Першин Г.Д., Пшеничная Е.Г. Энергетические критерии квазихрупкого разрушения горных пород в технологических процессах их добычи и

первичной переработки // Горная промышленность. 2022. №2. С. 84-89.

11. Першин Г.Д., Пшеничная Е.Г., Северин Е.В. Определение размеров зоны и степени трещинообразования при шпуровой отбойке блочного камня // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2003. №4. С. 28-32.

References

1. Pershin G.D., Karaulov N.G., Ulyakov M.S. Modern technological schemes for the extraction of high-strength block stone. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015;(3):5-11. (In Russ.)
2. Alimov O.D., Mamasaidov M.T. *Tekhnicheskie sredstva otdeleniya blokov kamnya ot massiva* [Technical means for separating stone blocks from the massif]. Frunze: Ilim, 1987, 216 p. (In Russ.)
3. Karasev Yu.G. Bakka N.T. *Prirodnyi kamen. Dobycha. Dobycha blochnogo i stenovogo kamnya* [Natural stone. Extraction. Extraction of block and wall stones]. Saint Petersburg: Saint Petersburg Mining Institute, 1997, 428 p. (In Russ.)
4. Pershin G.D., Ulyakov M.S. Providing a rationale for methods of preparing for the excavation of high-strength natural block stone. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2010;(4):14-19. (In Russ.)
5. Pshenichnaya E.G. *Obosnovanie ratsionalnykh parametrov tekhnologii dobychi granitnykh blokov s primeneniem nevzryvchatykh razrushayushchikh sredstv: dis. ... kand. tekhn. Nauk* [Providing a rationale for reasonable parameters of the technology

for extracting granite blocks using non-explosive cracking agents: PhD thesis]. Magnitogorsk, 2006. 167 p.

6. Pershin G.D., Pshenichnaya E.G. Solution of the Lamé problem in a quasi-brittle formulation to provide a rationale for the model of calculating the destruction of rocks by the blasthole method. *Gornyi zhurnal. Izv. vuzov* [Mining Journal. News of Higher Institutions]. 2023;(3):53-63. (In Russ.)
7. Pershin G.D., Pshenichnaya E.G. The concept of quasi-brittle fracture of rocks in relation to the processes of their extraction and primary processing. *Gornyi zhurnal. Izv. vuzov* [Mining Journal. News of Higher Institutions]. 2022;(4):64-75. (In Russ.)
8. Pershin G.D., Pshenichnaya E.G. Basics of calculating technological parameters of natural stone extraction using the stress and strain state. *Dobycha, obrabotka i primeneniye prirodnogo kamnya: sb. nauch. tr.* [Extraction, processing and use of natural stone: collection of papers]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2001, no. 1, pp.77-94. (In Russ.)
9. Latyshev O.G. *Razrusheniye gornykh porod* [Destruction of rocks]. Moscow: Teplotekhnika, 2007, 660 p. (In Russ.)
10. Pershin G.D., Pshenichnaya E.G. Energy criteria for quasi-brittle fracture of rocks in technological processes of their extraction and primary processing. *Gornaya promyshlennost* [Mining Industry]. 2022;(2):84-89. (In Russ.)
11. Pershin G.D., Pshenichnaya E.G., Severin E.V. Determining the size of the zone and the degree of cracking during hole breaking of block stone. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2003;(4):28-32. (In Russ.)

Поступила 26.09.2023; принята к публикации 07.02.2024; опубликована 28.03.2024
Submitted 26/09/2023; revised 07/02/2023; published 28/03/2024

Першин Геннадий Дальтонович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры горных машин и транспортно-технологических комплексов, Магнитогорский государственный технический университет им Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.

Пшеничная Елена Геннадьевна – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры механики, Магнитогорский государственный технический университет им Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: pshenichnaya_e@mail.ru.

Gennady D. Pershin – DrSc (Eng.), Professor, Professor of the Department of Mining Machines and Transport and Technological Complexes, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Elena G. Pshenichnaya – PhD (Eng.), Senior Lecturer of the Department of Mechanics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: pshenichnaya_e@mail.ru.

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

METALLURGY OF FERROUS, NON-FERROUS AND RARE METALS

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

УДК 669.531.12+004.942+001.891.573

DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-1-20-28



БЛОЧНО-МОДУЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ БИМОЛЕКУЛЯРНОГО ГЕТЕРОГЕННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИ ОБЖИГЕ СУЛЬФИДА МЕТАЛЛА

Зароченцев В.М., Рутковский А.Л., Кондратенко Т.В., Макоева А.К.

Северо-Кавказский горно-металлургический институт (Государственный технологический университет),
Владикавказ, Россия

Аннотация. В статье рассмотрено моделирование гетерогенного взаимодействия твердого мелкодисперсного материала с газообразным реагентом в условиях идеального смешения при обжиге сульфидных цинковых материалов в печах кипящего слоя. Для описания влияния параметров на течение технологических процессов из моделируемой системы выделяются математические модели с набором входных и выходных параметров, которые затем объединяются в модули по функциональным связям. В ходе исследования решена задача разработки такой модели, которая позволяет проводить оценку состояний процесса обжига и выполнять расчеты показателей технологической системы при изменении внешних и внутренних параметров. Разработка модели выполнялась на основе экспериментально-аналитического описания протекающих процессов, закономерностей химической кинетики гетерогенных реакций между газовой фазой и твердыми частицами, уравнений равновесия потоков веществ в реакторе идеального смешения и термодинамических соотношений идеальных газов. Созданная математическая модель описывает механизм процесса обжига с учетом парциальных давлений реагентов, площади реакционного взаимодействия и интенсивности перемешивания твердого материала во взвешенном состоянии. Разработанная блочно-модульная модель в программном пакете Matlab Simulink позволяет выделить основные процессы и параметры в структурированной системе блоков, проводить имитационное моделирование, оценивать и предсказывать влияние различных условий на показатели процесса, проводить оптимизацию технологической системы. Выполнено объединение отдельных процессов в вычислительные модули, с помощью которых создается систематизированное иерархическое математическое описание в виде вычислительных блоков, в результате чего создается наглядная и хорошо структурированная система, в которой удобно выделить необходимые параметры и процессы для моделирования и изучения. Модель наглядно отражает механизм обжига цинкового концентрата в печах кипящего слоя и изменение его показателей в зависимости от условий проведения процесса и применима для подобных процессов металлургического и химического производства.

Ключевые слова: математическое моделирование, идеальное смешение, Simulink, обжиг, кипящий слой, химическая кинетика, металлургия цинка, численные методы, вычислительные модули

© Зароченцев В.М., Рутковский А.Л., Кондратенко Т.В., Макоева А.К., 2024

Для цитирования

Блочное-модульное моделирование и исследование бимолекулярного гетерогенного взаимодействия при обжиге сульфида металла / Зароченцев В.М., Рутковский А.Л., Кондратенко Т.В., Макоева А.К. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №1. С. 20-28. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-20-28>



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

BLOCK-MODULAR SIMULATION AND STUDY ON A BIMOLECULAR HETEROGENEOUS INTERACTION DURING ROASTING OF METAL SULFIDE

Zarochentsev V.M., Rutkovsky A.L., Kondratenko T.V., Makoeva A.K.

North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), Vladikavkaz, Russia

Abstract. The paper discusses the simulation of a heterogeneous interaction between a solid finely dispersed material and a gaseous reagent under conditions of the ideal mixing during roasting of zinc sulfide materials in fluidized bed furnaces. To describe the influence of parameters on the flow of technological processes, mathematical models with a set of input and output parameters are isolated from the simulated system and then combined into modules according to the functional connections. In the course of the study, the authors solved the problem of developing a model used to assess the states of the roasting process and calculating the performance of the technological system when changing external and internal parameters. The model was developed on the basis of an experimental and analytical description of the ongoing processes, the laws of chemical kinetics of heterogeneous reactions between the gas phase and solid particles, the equilibrium equations of substance flows in an ideal mixing reactor and the thermodynamic relationships of ideal gases. The designed mathematical model describes the mechanism of the roasting process, taking into account partial pressures of the reagents, the area of the reaction interaction and the rate of mixing the solid material in suspension. The block-modular model developed in the Matlab Simulink software package contributes to identifying the main processes and parameters in the structured system of blocks, carrying out simulation modeling, evaluating and predicting the influence of various conditions on process indicators, and optimizing the technological system. The authors combined individual processes into computational modules used to create a systematic hierarchical mathematical description as the computational blocks, resulting in a visual and well-structured system, where it is convenient to highlight the necessary parameters and processes for modeling and study. The model clearly reflects the mechanism of roasting a zinc concentrate in fluidized bed furnaces and the change in its parameters depending on the process conditions, and this is applicable for similar processes in the metallurgical and chemical production.

Keywords: mathematical modeling, ideal mixing, Simulink, roasting, fluidized bed, chemical kinetics, zinc metallurgy, numerical methods, computational modules

For citation

Zarochentsev V.M., Rutkovsky A.L., Kondratenko T.V., Makoeva A.K. Block-Modular Simulation and Study on a Bimolecular Heterogeneous Interaction During Roasting of Metal Sulfide. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 1, pp. 20-28. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-20-28>

Введение

Наибольшее количество цинка до настоящего времени получают гидрометаллургическим способом с обжигом сульфидного концентрата в печах кипящего слоя. Окислительный обжиг в кипящем слое обладает большой производительностью и позволяет получать огарок, состоящий в основном из окисленного цинка, а также отходящие газы, содержащие сернистый газ в количестве, достаточном для производства серной кислоты. Протекание процессов окисления в автогенном режиме требует применения систем автоматического контроля и регулирования параметров процесса для обеспечения заданных показателей процесса [1-3]. Для эффективного функционирования такой системы в быстро изменяющихся условиях требуется заранее получать рекомендации, позволяющие поддерживать оптимальные показатели процесса [4]. Одним из наиболее эффективных методов решения поставленной задачи является определение показателей с помощью математической модели,

описывающей эти процессы [5, 6], и последующая обработка получаемых данных с применением современных информационных технологий [7, 4].

Математическое моделирование металлургических процессов вызывает значительные сложности из-за многообразия протекающих в них химических реакций и, следовательно, множеством нелинейных уравнений [8, 9]. Решение этих уравнений возможно с применением итерационных методов. Для описания влияния многочисленных параметров на течение технологических процессов из моделируемой системы выделяются простые элементы с набором входных и выходных параметров, которые затем объединяются в модули по функциональным связям [10, 11]. Из отдельных модулей создается систематизированное иерархическое математическое описание в виде вычислительных блоков, наглядная и хорошо структурированная система [12, 13]. Для создания таких моделей широко применяются специализированные пакеты программ, такие как Matlab, Simulink, Anylogik [14-16].

Поэтому была поставлена задача разработки модели, позволяющей проводить оценку состояния процесса обжига и выполнять расчеты показателей технологической системы при изменении внешних и внутренних параметров.

Материалы и методы исследования

Взаимодействие твердого материала и газовой среды происходит в аппаратах со взвешенным кипящим слоем вибро- или механическим перемешиванием, причём многие из протекающих таким образом процессов могут быть с достаточной точностью описаны моделями идеального смешения [18-20]. В качестве основной реакции этого процесса рассмотрим бимолекулярное взаимодействие:



где MeS – сульфид металла (Zn, Ni и др.); MeO – образующийся оксид металла.

Реакция (1) является основной при обжиге сульфидного цинкового концентрата в кипящем слое. Поэтому при создании модели обжига необходимо исследование этого процесса. Обобщенно это уравнение представим в виде следующей реакции:



На основании уравнения (2) зададим следующие условия процесса: вещества A и R являются газами, а вещества B и S содержатся в твердой фазе; в газовой фазе присутствует также нейтральный газ N , а в твердой фазе – не реагирующий остаток Z ; условия перемешивания приближаются к идеальным. Материальный баланс этого процесса описывается следующей системой уравнений:

$$\frac{P_{A_0} \cdot v_0}{R_a \cdot T_0} = \frac{P_A \cdot v}{R_a \cdot T} + r_{PS} \cdot V, \quad (3a)$$

$$g_{h_0} \cdot \gamma_{B_{h_0}} = g_h \cdot \gamma_{B_h} + r_{PS} \cdot V \cdot M_B, \quad (3б)$$

$$\frac{P_R \cdot v}{R_a \cdot T} = r_{PS} \cdot V, \quad (3в)$$

$$g_S = r_{PS} \cdot V, \quad (3г)$$

$$\frac{P_{N_0} \cdot v_0}{T_0} = \frac{P_N \cdot v}{T}, \quad (3д)$$

$$g_{Z_0} = g_Z, \quad (3е)$$

где P_{A_0} и P_A – давление A в смеси газов, Па; v_0 и v – скорость потока газа, м³/с; T_0 и T – температура в реакторе, К; R_a – универсальная газовая постоянная; V – объем реактора, м³; g_{Z_0} и g_Z – содержание

нейтрального твердого компонента кека в пульпе, кг/м³; r_{PS} – скорость реакции, $\frac{\text{моль}}{\text{с} \cdot \text{м}^3}$; $\gamma_{B_{h_0}}$ и γ_{B_h} – содержание реагирующего компонента B в твердом на входе и выходе; M_B – молекулярная масса вещества B ; индексом «0» обозначены величины во входном потоке, без индекса – в выходном потоке и внутри реактора.

В общем случае скорость гетерогенной реакции (2) зависит от реакционной поверхности и давления реагирующего вещества в газовой фазе [17, 21]:

$$r_{PS} = K_{PS} \cdot P_A^{\mathcal{G}_A} \cdot S_B^{\mathcal{G}_B}, \quad (4)$$

где K_{PS} – константа скорости реакции; \mathcal{G}_A и \mathcal{G}_B – порядок реакции по веществам A и B (принимая равными 1); S_B – удельная реакционная поверхность, м²/кг.

В связи с тем, что взаимодействие между газом и твердым мелкодисперсным материалом происходит в режиме диффузионного контроля, константа скорости реакции зависит от скорости перемешивания шихты. Поэтому константу скорости реакции выразим уравнением, подобным уравнению Аррениуса:

$$K_{PS} = k_{0_{PS}} \cdot e^{\frac{E_{a_{PS}}}{R \cdot T}}, \quad (5)$$

где $k_{0_{PS}}$ и $E_{a_{PS}}$ – эмпирические коэффициенты.

Реакционная поверхность S_B зависит от количества твердого в реакционном объеме, содержания B в твердом, размера и формы частиц. Поэтому выразим реакционную поверхность следующей формулой:

$$S_B = k_S \cdot G_h \cdot \gamma_{B_h}, \quad (6)$$

где k_S – эмпирический коэффициент удельной поверхности частиц на единицу массы твердого; γ_{B_h} – содержание реагирующего компонента B в твердом; G_h – содержание твердого в реакционной среде, кг/м³.

Давление смеси газов на выходе при правильном решении системы уравнений (3a)-(3е) должно быть равно внешнему, что выражается уравнением баланса давлений:

$$P_A + P_S + P_N - P_{at} = 0, \quad (7)$$

где P_{at} – давление окружающей среды.

Создание блочно-модульной схемы. Для решения полученной системы уравнений была создана блочно-модульная схема Simulink [14], приведенная на **рис. 1**. В **таблице** приведены некоторые параметры этой модели и входящие в неё модули.

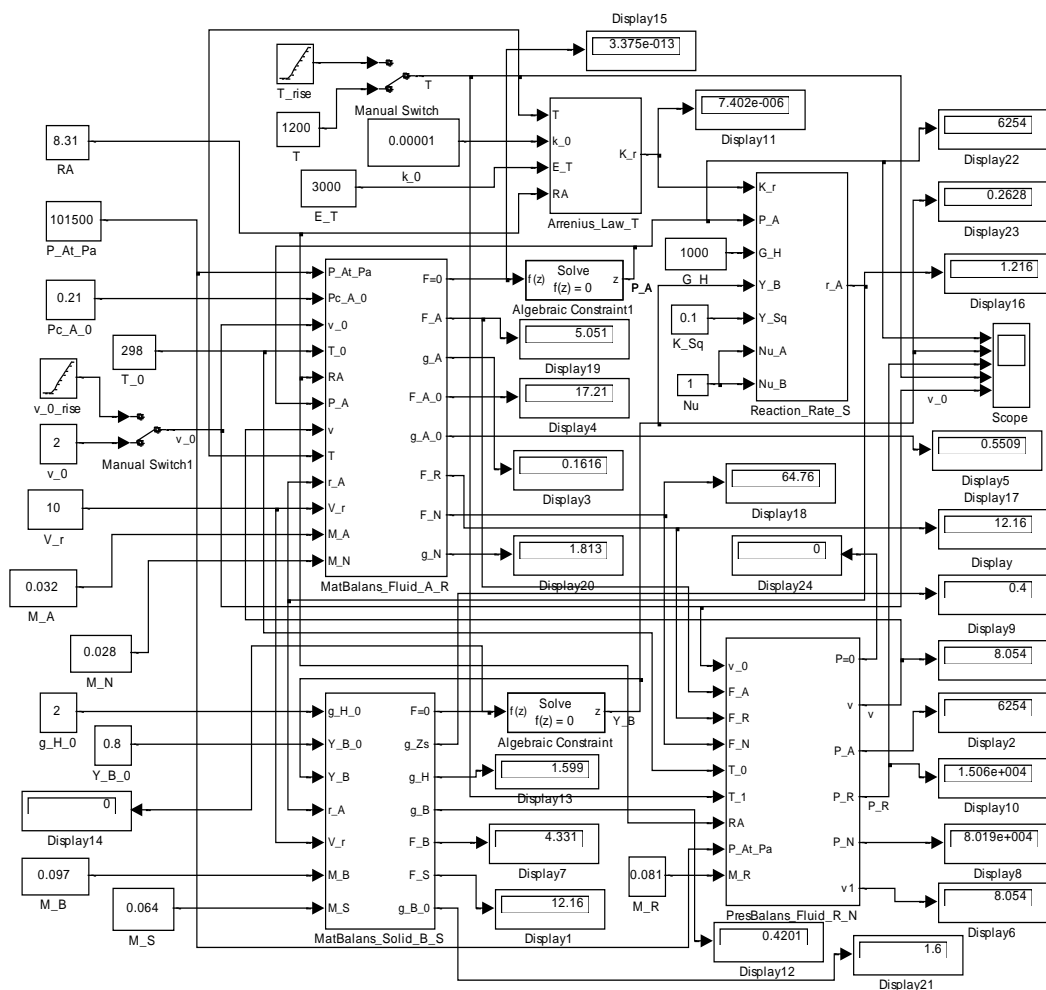


Рис. 1. Блочнo-модульная схема, описывающая механизм взаимодействия по реакции (2) газа и твердого сыпучего вещества (шихты) в реакторе идеального смешения
 Fig. 1. A block-modular diagram describing the mechanism of interaction by a reaction (2) of gas and a solid bulk substance (charge) in an ideal mixing reactor

Таблица. Параметры блочно-модульной схемы Simulink
 Table. Parameters of the block-modular Simulink diagram

Наименование модуля/блока	Обозначение в тексте, уравнение	Обозначение на схеме	Значение	Единицы измерения
Парциальное давление газа A на входе	$P_{A_0}^*$	Pc_A_0	0,21	атм
Объем реактора	V	V_r	10	м ³
Поток твердого на входе	g_{h_0}	g_H_0	2	кг/с
Содержание B в твердом на входе	$\gamma_{B_{h_0}}$	Y_B_0	0,8	доли ед.
Содержание твердого в реакционной среде	G_h	G_H	1000	кг/м ³
Скорость подачи газа	v_0	v_0	[1,5-2,5]*	м ³ /с
Температура реакции	T	T	[1000-1400]*	К
Скорость реакции	уравнение (4)	Reaction_Rate_S	[1,216]*	$\frac{\text{МОЛЬ}}{\text{С} \cdot \text{М}^3}$
Константа скорости реакции	уравнение (5)	Arrenius_Law_T	[7,402e-6]*	
Материальный баланс веществ A, R	уравнение (3a)	MatBalans_Fluid_A_R	0	моль/с
Материальный баланс веществ B, S	уравнение (3б)	MatBalans_Solid_B_S	0	моль/с
Баланс давлений R, N, A	уравнение (7)	MatBalans_Fluid_R_N	0	Па

* В квадратных скобках указаны величины, изменяющие свои значения.

В модели реализован механизм процесса взаимодействия газа и твердого диспергированного материала, протекающего в перемешиваемом слое пульпы, и исследовано влияние различных факторов на этот процесс. Во входных блоках констант в левой части модели задаются значения параметров, которые обрабатываются в модулях и соответствуют уравнениям математической модели. В правой части модели в блоках «Score» и «Display» отображаются результаты моделирования и сохраняются данные в память для дальнейшей обработки и построения графиков.

Модули «Reaction_Rate_S», «Arrhenius_Law_T» рассчитывают скорость реакции и константу скорости, по соответствующим уравнениям (4) и (5). Рассчитанные параметры передаются в модули «MatBalans_Fluid_A_R», «MatBalans_Solid_B_S», в которых вычисляются уравнения материального баланса по A и B, которые должны дать нулевое значение на выходе. Если решение отличается от нуля, то с помощью блоков «AlgebraicConstraint» подбираются такие значения давления газа A (P_A) и содержания вещества B (Y_B), которые позволят уменьшить отклонение от нуля до минимального значения. Как видно на схеме, отклонение получено порядка 10^{-13} .

Модуль «PresBalans_Fluid_R_N» вычисляет давления газов R и N, а также решает уравнение баланса давлений (7), при правильном решении это уравнение равно нулю, как видно на рис. 1.

Модули в представленной на рис. 1 схеме реализованы в виде подсистем. В качестве примера организации такой подсистемы рассмотрим блок «MatBalans_Fluid_A_R», представленный развернуто на рис. 2 [14]. В левой части схемы на рис. 2 находятся входы модуля: «P_At_Pa» – давление окружающей среды, Па; «Pc_A_0» – парциальное давление газа A на входе; «v_0» – объемная скорость подачи газа на входе, м³/с; «T_0» – температура на входе, К; «RA» – универсальная газовая постоянная; «P_A» – давление газа A на выходе, Па; «v» – скорость потока газа на выходе, м³/с; «T» – температура на выходе, К; «r_A» – скорость химической реакции, моль/(м³ · с); «V_r» – объем реактора, м³; «M_A» и «M_N» – молекулярная масса веществ A и N, кг/моль [7].

Вычисление материального баланса газа A происходит в блоке Add по формуле

$$F_{A_0} - F_A - F_r = 0. \quad (8)$$

Полученное значение передается через выход «F=0» на итерационный блок для подбора верного значения P_A .

В блоке «P_A_0» выполняется преобразование парциального давления газа A в физическое по формуле

$$P_{A_0} = P_{A_0}^* \cdot P_{at} \text{ [Па]}. \quad (9)$$

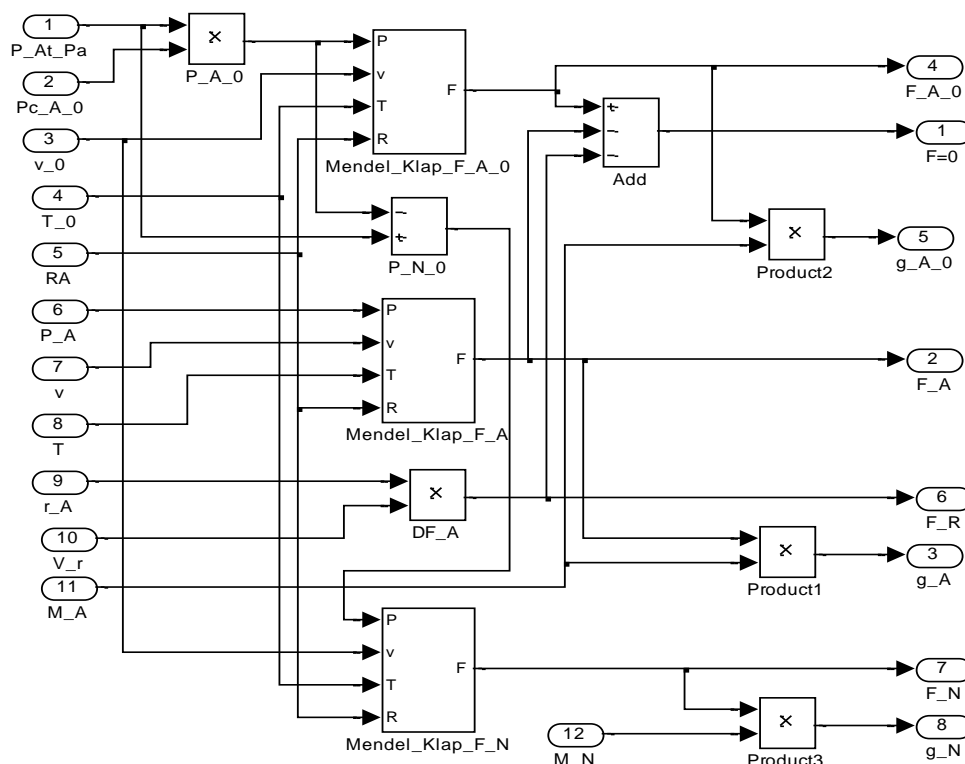


Рис. 2. Схема модуля «MatBalans_Fluid_A_R» для вычисления уравнения материального баланса по веществу A и материальных потоков A, R, N

Fig. 2. Diagram of the MatBalans_Fluid_A_R module for calculating the equation of material balance for substance A and material flows A, R, N

Физическое давление нейтрального газа вычисляется в блоке «P_N_0» по формуле

$$P_{N_0} = P_{at} - P_{A_0} \text{ [Па]}. \quad (10)$$

Поток вещества [A] на входе вычисляется в блоке «Mendel_Klap_F_A_0» по уравнению Менделеева-Клапейрона:

$$F_{A_0} = \frac{P_{A_0} \cdot V_0}{R_a \cdot T_0}. \quad (11)$$

Аналогично вычисляется поток вещества [A] на выходе в блоке «Mendel_Klap_F_A»:

$$F_A = \frac{P_A \cdot V}{R_a \cdot T}. \quad (12)$$

Поток нейтрального газа N одинаков на входе и выходе, его численное значение вычисляется в блоке «Mendel_Klap_F_N» по уравнению

$$F_{N_0} = F_N = \frac{P_{N_0} \cdot V_0}{R_a \cdot T_0}. \quad (13)$$

На основании стехиометрических соотношений поток вещества R определяется скоростью химической реакции и вычисляется в блоке «DF_A» по формуле

$$F_R = r_{PS} \cdot V_r. \quad (14)$$

Рассчитанные по уравнениям (11)-(14) значения потоков веществ поступают на соответствующие выходы: «F_A_0», «F_A», «F_N», «F_R». Пересчет этих потоков из молей в килограммы осуществляется умножением на молекулярную массу соответствующего вещества:

$$g_x = F_x \cdot M_x \left[\frac{\text{кг}}{\text{с}} \right], \quad (15)$$

где x – вещество в соответствующем потоке (A, A_0, R, N). Пересчитанные значения потоков поступают на соответствующие выходы: «g_A_0», «g_A», «g_N», «g_R».

Результаты и их обсуждение

Для моделирования влияния факторов потока раствора через реактор и перемешивания были установлены блоки переключения «Manual Switch» и блоки линейного изменения параметров v_0_rise и T_rise . Результаты моделирования приведены на **рис. 3**.

Анализ графиков на **рис. 3** показывает, что решение модели в изменяющихся условиях соответствует описанному в уравнениях механизму протекания процесса химического взаимодействия газа и диспергированного твердого материала в реакторе идеального смешения.

Полученные результаты исследований позволяют использовать разработанную блочно-модульную мо-

дель для прогнозирования показателей процесса обжига сульфидных металлургических концентратов в печах кипящего слоя и настройки параметров систем управления протекающих процессов [22-25].

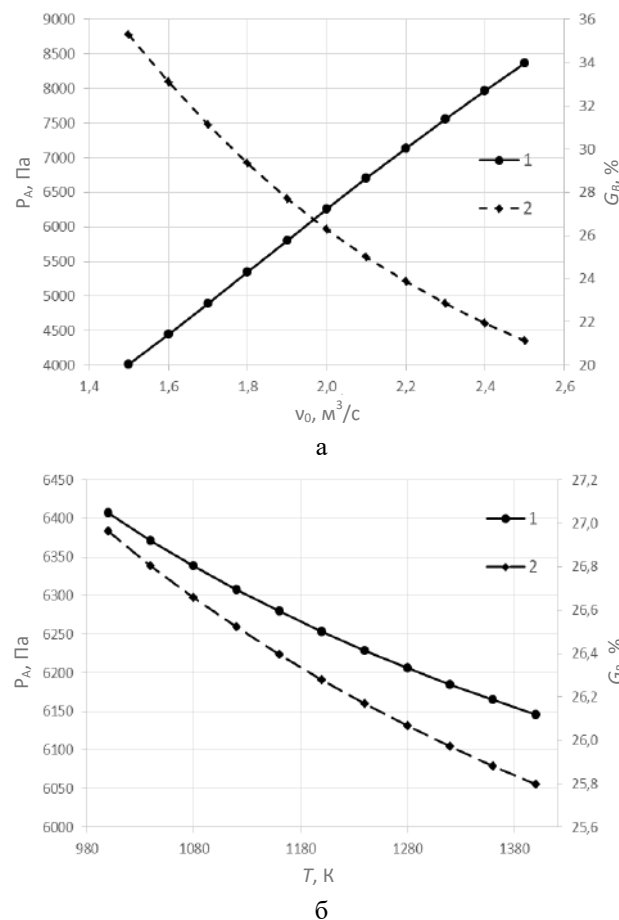


Рис. 3. Давление газа A в реакционном слое (кривая 1) и содержание вещества B (кривая 2) в зависимости от скорости подачи воздуха (а) и температуры (б)

Fig. 3. Pressure of gas A in the reaction layer (curve 1) and the content of substance B (curve 2) depending on the air supply rate (a) and temperature (b)

Выводы

1. Процесс обжига сульфидных цинковых концентратов представлен математической моделью, которая учитывает скорость перемешивания, парциальные давления реагентов в смеси и площадь реакционной поверхности твердого реагента.

2. Для решения полученной математической модели процесса обжига уравнений была создана блочно-модульная схема в Simulink, которая представляет основные процессы и параметры в структурированной системе блоков. Это позволяет проводить имитационное моделирование и оптимизировать процесс, а также оценивать и предсказывать влияние различных условий на показатели обжига.

3. Выполнено решение разработанной модели с применением итерационных методов, которое наглядно отражает механизм обжига сульфидных цинксодержащих материалов в кипящем слое и изменение показателей процесса в зависимости от условий его проведения с высокой степенью адекватности. Возможно применение методов нейросетевой адаптации коэффициентов модели в условиях непрерывного получения технологической информации.

4. Разработанная методика блочно-модульного моделирования может быть расширена для других металлургических переделов и позволяет создавать библиотеки блоков для различных процессов.

Список источников

1. Белоглазов И.И. Моделирование и управление процессом обжига металлургических концентратов в печах кипящего слоя: дис. ... канд. техн. наук. СПб.: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2012. 126 с.
2. Толибов Б.И., Сайдахмедова Л.А., Уткирова Ш.И. Обзор технологий по окислительному обжигу сульфидных золотосодержащих кеков бактериального выщелачивания // Journal of Advances in Engineering Technology. 2022. №1. С. 64-67.
3. Обзор исследования технологии окислительного обжига золотосодержащих углистых концентратов / Сайдахмедова Л.А., Толибов Б.И., Жабборова С.Г., Исломов И.Н. // Universum: технические науки. 2023. №2(107). С. 38-43.
4. Кимяев И.Т., Спесивцев А.В. Нечетко-возможностный подход к управлению сложностью интегрированных информационно-управляющих систем // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2022. Т. 65. №11. С. 813-817.
5. Алкацев В.М., Рутковский А.Л., Макоева А.К. Исследование процесса обжига цинковых концентратов в кипящем слое методом математического моделирования // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. №4. С. 669-676.
6. К вопросу математического моделирования процесса обжига в кипящем слое / Смольянинов В.В., Данилянц А.Э., Гудушаури З.Б., Хадзарагова Е.А. // Синтез науки и образования как механизм перехода к постиндустриальному обществу: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. Уфа, 2020. С. 66-68.
7. Кудасов А.М. Компьютерное моделирование металлургических процессов в программе AnyLogic // Наука и современность. 2012. №19-2. С. 60-67.
8. Мунц В.А., Ивакина С.А., Чойнзонов Д.Б. Изучение кинетики окисления сульфидного цинкового концентрата в печи кипящего слоя // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2017. Т. 17. №3. С. 34-42.
9. Трусов Б.Г. Моделирование кинетики химических превращений: термодинамический подход // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Естественные науки». 2005. №3. С. 26-38.
10. Зароченцев В.М., Кондратенко Т.В., Макоева А.К. Динамика реакции в ячейке с идеальным смешением в растворе // Инженерный вестник Дона. 2018. №2 (49). С. 66.
11. Зароченцев В.М., Кондратенко Т.В., Макоева А.К. Методика статистического анализа стационарной кинетической модели ячейки идеального смешения // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2018. Т. 80. №4. С. 133-137.
12. Зароченцев В.М. Применение метода блочного моделирования каскада реакторов выщелачивания в среде Matlab // Известия вузов. Цветная металлургия. 2006. №4. С. 61-66.
13. Зароченцев В.М., Рутковский А.Л., Болотаева И.И. Блочно-модульное моделирование механизма физико-химических процессов, протекающих при вельцевании цинковых кеков // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и Технические Науки. 2023. №12. С. 62-72.
14. Corina M.D., Popa G.N., Iagar A. Mathematical Modeling and Simulation in Matlab/Simulink of Processes from Iron Ore Sintering Plants // WSEAS TRANSACTIONS on SYSTEMS. 2009, vol. 8, no. 1, pp. 34-43.
15. Development of a Dynamic Population Balance Plant Simulator for Mineral Processing Circuits / Khoshnam F., Khaledi M.R., Darban A.K., Zarei M.J. // Int. J. Min. & Geo-Eng. June 2015, vol. 49, no. 1, pp. 143-153.
16. Середа С.Н. Особенности моделирования химических реакторов в Matlab // Методы и устройства передачи и обработки информации. 2021. №23. С. 89-94.
17. Ивакина С.А., Мунц В.А. Печь кипящего слоя для обжига цинковых концентратов как объект регулирования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. №9. С. 31-42.
18. Нарзуллаев Ж.Н.У., Фазлиддинова Х.В.К., Шералиев Б.З.У. Исследование химических превращений при обжиге упорного золотосодержащего сырья // Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации: сб. ст. LVI Междунар. науч.-практ. конф. Пенза, 2022. С. 78-80.
19. Куприяшкин А.Г., Петухова Л.И. Математические модели металлургических процессов в AnyLogic // Научный вестник Арктики. Технические науки. 2019. №5. С. 6-12.
20. Орлов А.К. Стадийность окисления сульфидов при окислительном обжиге полиминеральных сульфидных концентратов // Записки Горного института. 2006. Т. 169. С. 163-166.
21. Имитационное моделирование обжига цинковых концентратов в печах кипящего слоя / Алкацев М.И., Алкацев В.М., Волошин С.Б., Дзгоев А.Э., Абаев З.К. // Вестник ЮУрГУ. Серия: Металлургия. 2018. Т. 18. №3. С. 26-32.

22. Исследование процесса обжига цинковых концентратов в кипящем слое методом математического моделирования / Рутковский А.Л., Дюнова Д.Н. и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2013. №3. С. 217-222.
23. Корнилицин Д.К., Дадиомов Р.Ю., Шумихин А.Г. К приобретению знаний по управлению технологическим процессом сушки kcl в печи кипящего слоя на калийном предприятии с целью разработки экспертной системы // Автоматизированные системы управления и информационные технологии: матер. Всерос. науч.-техн. конф. В 2-х т. Т. 1. Пермь, 2022. С. 350-354.
24. Серегин П.С., Румянцев Д.В., Максимов Д.Б. Совершенствование конструкции печей обжига медного концентрата с использованием метода физического моделирования // Записки Горного института. 2005. Т. 165. С. 160-162.
25. Любанова А.Ш., Минишин Д.Д., Гушин М.А. Моделирование процесса управления обжигом молибденового концентрата в печи кипящего слоя // Высшая школа: научные исследования: матер. Межвуз. междунар. конгресса. М., 2022. С. 223-231.
7. Kudasov A.M. Computer modeling of metallurgical processes in AnyLogic. *Nauka i sovremennost* [Science and Modernity]. 2012;(19-2):60-67. (In Russ.)
8. Munts V.A., Ivakina S.A., Choinzonov D.B. Study on the zinc sulfide concentrate oxidation kinetics in a fluidized bed furnace. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering]. 2017;17(3):34-42. (In Russ.)
9. Trusov B.G. Modeling of kinetics of chemical transformations: a thermodynamic approach. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya «Estestvennye nauki»* [Herald of Bauman Moscow State Technical University. Series: Natural Sciences]. 2005;(3):26-38. (In Russ.)
10. Zarochentsev V.M., Kondratenko T.V., Makoeva A.K. Dynamics of the reaction in a cell with ideal mixing in the solution. *Inzhenerny vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don]. 2018;(2(49)):66. (In Russ.)
11. Zarochentsev V.M., Kondratenko T.V., Makoeva A.K. Statistical analysis methods for a stationary kinetic model of an ideal mixing cell. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologii* [Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies]. 2018;80(4):133-137. (In Russ.)
12. Zarochentsev V.M. Application of the method of block modeling of the cascade of leaching reactors in Matlab. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya* [Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy]. 2006;(4):61-66. (In Russ.)
13. Zarochentsev V.M., Rutkovsky A.L., Bolotaeva I.I. Block-modular simulation of the mechanism of physical and chemical processes occurring during the Waelz process of zinc cakes. *Sovremennaya nauka: aktualnye problemy teorii i praktiki. Seriya: Estestvennye i Tekhnicheskie Nauki* [Modern Science: Current Problems of Theory and Practice. Series: Natural and Technical Sciences]. 2023;(12):62-72. (In Russ.)
14. Corina M.D., Popa G.N., Iagar A. Mathematical modeling and simulation in Matlab/Simulink of processes from iron ore sintering plants. *WSEAS Transactions on Systems*. 2009;8(1):34-43.
15. Khoshnam F., Khalesi M.R., Darban A.K., Zarei M.J. Development of a dynamic population balance plant simulator for mineral processing circuits. *Int. J. Min. & Geo-Eng.* 2015;49(1):143-153.
16. Sereda S.N. Features of modeling chemical reactors in Matlab. *Metody i ustroystva peredachi i obrabotki informatsii* [Information Transmission and Processing Methods and Devices]. 2021;(23):89-94. (In Russ.)
17. Ivakina S.A., Munts V.A. A fluidized bed furnace for roasting zinc concentrates as an object of control. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering]. 2018;329(9):31-42. (In Russ.)

References

1. Beloglazov I.I. *Modelirovanie i upravlenie protsesom obzhiga metallurgicheskikh kontsentratov v pechakh kipyashchego sloya: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Modeling and control of a metallurgical concentrate roasting process in fluidized bed furnaces: PhD thesis]. Saint Petersburg, 2012. 126 p.
2. Tolibov B.I., Saidakhmedova L.A., Utkirova Sh.I. Review of technologies for oxidizing roasting of sulfide gold-containing cakes of bacterial leaching. *Journal of Advances in Engineering Technology*. 2022;(1):64-67. (In Russ.)
3. Saidakhmedova L.A., Tolibov B.I., Zhabborova S.G., Islomov I.N. Review of the study on the technology of oxidizing roasting of gold-containing carbonaceous concentrates. *Universum: tekhnicheskie nauki* [Universum: Technical Sciences]. 2023;(2(107)):38-43. (In Russ.)
4. Kimyaev I.T., Spesivtsev A.V. A fuzzy-possibilistic approach to managing the complexity of integrated information and control systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering]. 2022;65(11):813-817. (In Russ.)
5. Alkatsev V.M., Rutkovsky A.L., Makoeva A.K. Study on the process of roasting zinc concentrates in a fluidized bed by mathematical modeling. *iPolytech Journal*. 2022;26(4):669-676. (In Russ.)
6. Smolyaninov V.V., Danilyants A.E., Gudushauri Z.B., Khadzaragova E.A. Mathematical modeling of the roasting process in a fluidized bed. *Sintez nauki i obrazovaniya kak mekhanizm perekhoda k postindustrialnomu obshchestvu: sb. st. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Synthesis of science and education as a mechanism of the transition to a post-industrial soci-

18. Narzullaev Zh.N.U., Fazliddinova Kh.V.K., Sheraliev B.Z.U. Study on chemical transformations, when roasting resistant gold-containing raw materials. *Fundamentalnye i prikladnye nauchnye issledovaniya: aktualnye voprosy, dostizheniya i innovatsii: sb. st. LVI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Basic and applied scientific research: Current issues, achievements and innovations. Collection of research papers of the 56th International Scientific and Practical Conference]. Penza, 2022, pp. 78-80. (In Russ.)
19. Kupriyashkin A.G., Petukhova L.I. Mathematical models of metallurgical processes in AnyLogic. *Nauchnyy vestnik Arktiki. Tekhnicheskie nauki* [Scientific Bulletin of the Arctic. Technical Sciences]. 2019;(5):6-12. (In Russ.)
20. Orlov A.K. Staging of sulfide oxidation during oxidizing roasting of polymineral sulfide concentrates. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of the Mining Institute]. 2006;169:163-166. (In Russ.)
21. Alkatsev M.I., Alkatsev V.M., Voloshin S.B., Dzgoev A.E., Abaev Z.K. Simulation modeling of roasting zinc concentrates in fluidized bed furnaces. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Metallurgiya* [Bulletin of South Ural State University. Series: Metallurgy]. 2018;18(3):26-32. (In Russ.)
22. Rutkovsky A.L., Dyunova D.N. et al. Study on the process of roasting zinc concentrates in a fluidized bed by a mathematical modeling method. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. 2013;(3):217-222. (In Russ.)
23. Kornilitsin D.K., Dadiomov R.Yu., Shumikhin A.G. To acquire knowledge on the management of the technological process of drying kcl in a fluidized bed furnace at a potash plant in order to develop an expert system. *Avtomatizirovannyye sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii: mater. Vseros. nauch.-tekhn. konf.* [Automated control systems and information technology: Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference]. Perm, 2022, vol. 1, pp. 350-354. (In Russ.)
24. Seregin P.S., Rummyantsev D.V., Maksimov D.B. Improving the design of copper concentrate roasting furnaces using a physical modeling method. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of the Mining Institute]. 2005;165:160-162. (In Russ.)
25. Lyubanova A.Sh., Minishin D.D., Gushchin M.A. Simulation of the control process of roasting the molybdenum concentrate in a fluidized bed furnace. *Vysshaya shkola: nauchnye issledovaniya: mater. Mezhdunar. kongressa* [Higher School: Scientific research. Proceedings of the Interuniversity International Congress]. Moscow, 2022, pp. 223-231. (In Russ.)

Поступила 16.12.2023; принята к публикации 17.02.2024; опубликована 28.03.2024
Submitted 16/12/2023; revised 17/02/2024; published 28/03/2024

Зароченцев Владимир Михайлович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных технологий и систем, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (Государственный технологический университет), Владикавказ, Россия. Email: vlazarm@yandex.ru. ORCID 0009-0006-8380-6158

Рутковский Александр Леонидович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры металлургии цветных металлов и автоматизации металлургических процессов, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (Государственный технологический университет), Владикавказ, Россия. Email: rutkowski@mail.ru.

Кондратенко Татьяна Викторовна – кандидат технических наук, доцент кафедры металлургии цветных металлов и автоматизация металлургических процессов, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (Государственный технологический университет), Владикавказ, Россия. Email: nora-tan@rambler.ru.

Макоева Алла Константиновна – ассистент кафедры металлургии цветных металлов и автоматизация металлургических процессов, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (Государственный технологический университет), Владикавказ, Россия. Email: makoeva_alla@mail.ru.

Vladimir M. Zarochentsev – PhD (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information Technology and Systems, North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), Vladikavkaz, Russia. Email: vlazarm@yandex.ru. ORCID 0009-0006-8380-6158

Aleksandr L. Rutkovsky – DrSc (Eng.), Professor, Professor of the Department of Metallurgy of Non-Ferrous Metals and Automation of Metallurgical Processes, North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), Vladikavkaz, Russia. Email: rutkowski@mail.ru.

Tatiana V. Kondratenko – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Metallurgy of Non-Ferrous Metals and Automation of Metallurgical Processes, North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), Vladikavkaz, Russia. Email: nora-tan@rambler.ru.

Alla K. Makoeva – Teaching Assistant of the Department of Metallurgy of Non-Ferrous Metals and Automation of Metallurgical Processes, North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), Vladikavkaz, Russia. Email: makoeva_alla@mail.ru.

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 544.42:542.61:546.47
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-1-29-38



КИНЕТИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЦИНКА ЩЕЛОЧЬЮ

Якорнов С.А.¹, Мальцев Г.И.², Воинков Р.С.^{2,3}, Гребнева А.А.²

¹ ОАО «Уральская горно-металлургическая компания», Верхняя Пышма, Россия

² АО «Уралэлектромедь», Верхняя Пышма, Россия

³ Технический университет УГМК, Верхняя Пышма, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Цинксодержащие промпродукты металлургического производства представляют высокую экологическую опасность, оставаясь потенциальным альтернативным источником цинка и сопутствующих металлов. **Цель работы.** Изучение кинетических закономерностей выщелачивания цинка из состава $\text{CaO}\cdot\text{ZnO}$, образующегося при спекании пыли электродуговых печей с известняком. **Используемые методы.** Объектом исследования служил спек пыли электродуговых печей с известняком, который выщелачивали едким натром. Анализ исходных материалов выполнен атомно-эмиссионными спектральными методами с индуктивно-связанной плазмой и искровым источником возбуждения спектра, а также рентгенофазовым методом. **Новизна.** Спек, составляющий 11,9% Zn, 28,5% Ca, 16,6% Fe, 0,38% Mg, 0,14% Pb, <0,05% Cl, получали для перевода цинка в легкорастворимую форму $\text{CaO}\cdot\text{ZnO}$. **Результат.** Выщелачивание спека проводили при следующих условиях: исходная концентрация цинка $C_0 = 0,202\text{--}0,456$ г-ион/дм³; концентрация щелочи 9,2 моль/дм³ NaOH; отношение Ж/Т = 4-9; скорость перемешивания пульпы $V = 20$ рад·с⁻¹; температура $T = 333\text{--}363$ К; продолжительность процесса $\tau = 2,5$ ч. Цинк переходил в раствор в виде тетрагидроксоцинката натрия $\text{Na}_2[\text{Zn}(\text{OH})_4]$, а кальций оставался в малорастворимом остатке $\text{Ca}(\text{OH})_2$, который вступает во взаимодействие с CO_2 и образует нерастворимый карбонат кальция CaCO_3 . Режим выщелачивания спека соответствует кинетическому механизму, когда скорость процесса определяется протеканием химической реакции растворения цинка, с величиной энергии активации $E = 41,57$ кДж/моль. **Практическая значимость.** Полученные сведения позволяют определить пути интенсификации процесса: дополнительное измельчение твердой фазы перед обработкой щелочью; периодическое или непрерывное активирование поверхности частиц дисперсной фазы для снятия пленки побочных продуктов реакции – гидроксидов металлов-примесей и карбоната кальция; повышение температуры пульпы; перевод извлекаемого целевого элемента в форму хорошо растворимого соединения.

Ключевые слова: пыли электродуговых печей, известняк, обжиг, цинк, выщелачивание, едкий натр, кинетика, внешняя диффузия, энергия активации, концентрация, скорость перемешивания, температура

© Якорнов С.А., Мальцев Г.И., Воинков Р.С., Гребнева А.А., 2024

Для цитирования

Кинетический режим выщелачивания цинка щелочью / Якорнов С.А., Мальцев Г.И., Воинков Р.С., Гребнева А.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №1. С. 29-38. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-29-38>



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

A KINETIC MODE OF ZINC LEACHING WITH ALKALI

Yakornov S.A.¹, Maltsev G.I.², Voinkov R.S.^{2,3}, Grebneva A.A.²¹ OJSC Ural Mining and Metallurgical Company, Verkhnyaya Pyshma, Russia² JSC Uralelektromed, Verkhnyaya Pyshma, Russia³ UMMC Technical University, Verkhnyaya Pyshma, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). Zinc-containing intermediate products of metallurgy pose a high environmental hazard, remaining a potential alternative source of zinc and related metals. **Objectives.** The research is aimed at studying the kinetic patterns of zinc leaching from the composition of CaO·ZnO formed by sintering the dust of electric arc furnaces with limestone. **Methods Applied.** The subject of the study was sintered dust of electric arc furnaces with limestone, which was leached with caustic soda. The initial materials were analyzed by atomic emission spectral methods with inductively coupled plasma and a spark source of spectrum excitation, and by the X-ray phase method. **Originality.** Sintered dust, showing a percentage composition of 11.9 Zn; 28.5 Ca; 16.6 Fe; 0.38 Mg; 0.14 Pb; 0.05 Cl, was produced to convert zinc into an easily soluble form of CaO·ZnO. **Results.** Leaching of the sinter was carried out under the following conditions: initial zinc concentration $C_0 = 0.202\text{--}0.456$ g-ion/dm³; alkali concentration was 9.2 mol/dm³ NaOH; a solid-liquid ratio was 4-9; pulp mixing rate $V = 20$ rad·s⁻¹; temperature $T = 333\text{--}363$ K; duration $\tau = 2.5$ h. Zinc passed into the solution in the form of sodium tetrahydroxocincate $\text{Na}_2[\text{Zn}(\text{OH})_4]$, and calcium remained in slightly soluble residue $\text{Ca}(\text{OH})_2$, which interacts with CO_2 and forms insoluble calcium carbonate CaCO_3 . The leaching mode of the sinter corresponds to the kinetic mechanism, when the rate of the process is determined by the chemical reaction of zinc dissolution with an activation energy value of $E = 41.57$ kJ/mol. **Practical Relevance.** The obtained information contributes to determining ways to intensify the process: additional grinding of the solid phase before alkali treatment; periodic or continuous activation of the surface of the dispersed particles to remove the film of reaction by-products: hydroxides of metal impurities and calcium carbonate; increase in pulp temperature; and transfer of the extracted target element into the form of a highly soluble compound.

Keywords: electric arc furnace dust, limestone, roasting, zinc, leaching, caustic soda, kinetics, external diffusion, activation energy, concentration, mixing rate, temperature

For citation

Yakornov S.A., Maltsev G.I., Voinkov R.S., Grebneva A.A. A Kinetic Mode of Zinc Leaching with Alkali. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 1, pp. 29-38. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-29-38>

Введение

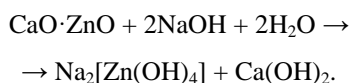
В пыли электродуговых печей (ЭДП) одной из основных форм цинка является феррит цинка (ZnFe_2O_4), трудно поддающийся химическому растворению в водных растворах. Обработка пыли ЭДП оксидом кальция CaO преобразует ZnFe_2O_4 в $\text{CaO}\cdot\text{ZnO}$ и $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ без карботермического восстановления. Также обеспечивается преимущественное удаление хлоридов, фторидов и тяжелых металлов при нагревании практически без потери цинка или железа при испарении. Выщелачивание цинка, которое включает растворение ZnO либо в кислых, либо в щелочных растворах, позволяет извлекать цинк из пыли, обработанной CaO [1-6]. Поскольку пыль ЭДП относится к категории опасных отходов, обработка пыли важна и для защиты окружающей среды [7, 8]. Предложено несколько различных методов извлечения цинка из пыли ЭДП, включая пирометаллургический процесс, гидromеталлургический процесс и гибридный процесс – термическое восстановление с последующим выщелачиванием [9, 10]. Широко используется пирометаллургический процесс Вельца

[11, 12]. Как с экологической, так и с экономической точки зрения этот процесс сопряжен с некоторыми проблемами: он требует углерода в качестве восстановителя и использования относительно высоких температур для получения неочищенного ZnO, который имеет небольшую коммерческую ценность и требует дальнейшей очистки [13-15].

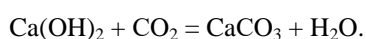
Преимуществом гидromеталлургического процесса извлечения цинка из пыли ЭДП является его низкое энергопотребление [9]. Выщелачивание ZnO возможно как в щелочной, так и в кислой среде. С другой стороны, большая часть цинка в пыли ЭДП находится в форме ZnFe_2O_4 . Поскольку это соединение очень стабильно и нерастворимо в щелочных или кислых средах при умеренных условиях, эффективность выщелачивания цинка с использованием гидromеталлургического процесса очень низкая [16]. Сообщалось, что эффективность выщелачивания цинка из пыли ЭДП обычными методами выщелачивания с использованием раствора NaOH составляет ~85%, в то время как для достижения высокого коэффициента извлечения требуются высокая концентрация и высокая температура [7, 14-17]. Обычное сернокислотное выщелачивание

цинка из пыли ЭДП обеспечивает низкую эффективность выщелачивания – 75-80% [18-25]. Однако следует отметить, что содержание хлоридов и фторидов в пыли вызывает проблемы [9].

В этом исследовании была изучена возможность щелочного выщелачивания спека пыли ЭДП с известняком (смеси фаз оксида цинка и оксида кальция) с использованием раствора NaOH для селективного выщелачивания цинка по сравнению с железом и кальцием:



Гидроксид кальция вступает во взаимодействие с углекислым газом и образует нерастворимый карбонат кальция и воду:



Также было изучено влияние температуры, исходной концентрации цинка и соотношения жидкое/твердое (Ж/Т). Установлено, что из обработанной оксидом кальция пыли раствором NaOH извлекается значительно больше цинка, чем из исходной пыли. Почти полное извлечение цинка из обработанной CaO пыли было достигнуто без какого-либо заметного растворения железа и кальция, которые оставались в виде $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ и $\text{Ca}_3\text{Fe}_2(\text{OH})_{12}$ в остатке выщелачивания, который может быть использован в сталелитейной промышленности в качестве флюса для дефосфорирования горячего металла или сырья для доменной печи.

Целью работы являлось изучение кинетических закономерностей выщелачивания цинка из состава $\text{CaO} \cdot \text{ZnO}$, образующегося при спекании пыли электродуговых печей с известняком, выявление механизмов, по которым протекают химические взаимодействия, что позволит наиболее эффективно влиять на скорость лимитирующей стадии процесса, минимизируя трудовые и материальные затраты по рекуперации цинка в товарный продукт.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования служил спек пыли электродуговых печей с известняком, который получали для перевода цинка в легко растворимую форму $\text{CaO} \cdot \text{ZnO}$. Исходный материал измельчали на истирателе вибрационном лабораторном ИВС-4 до порошка с размером частиц ~0,04 мм и выходом ~97% состава, %: 11,9 Zn; 28,5 Ca; 16,6 Fe; 0,38 Mg; 0,14 Pb; < 0,05 Cl. Фазовый и гранулометрический состав измельченного цинксодержащего материала приведен в табл. 1 и 2.

Для проведения экспериментов по выщелачиванию цинка использовали фракцию -0,1 мм, для которой по методике И 9106-13-2021 определили:

– плотность (истинная плотность, удельный вес) – 3,676 г/см³ (расчетная ориентировочная плотность по данным РФА – 3,872 г/см³);

– насыпная плотность (насыпной вес, объемный вес) – 1,371 г/см³.

Опыты по выщелачиванию спека едким натром проводили в статических условиях в следующих диапазонах исследованных параметров процесса: $C_{\text{O}(\text{Zn})} = 0,202-0,456$ г-ион/дм³ – исходная концентрация цинка в пульпе; $C_{\text{O}} = 9,2$ моль/дм³ NaOH – исходная концентрация выщелачивающего реагента; Ж/Т = 4-9; $V = 20$ рад/с – скорость перемешивания пульпы; 333-363 К – температура; 2,5 ч – продолжительность процесса. В результате цинк из состава спека переходил в раствор в виде тетрагидроксоцинката натрия, а кальций в основном оставался в малорастворимом остатке гидроксида.

Таблица 1. Фазовый состав измельченного цинксодержащего материала (данные РФА)
Table 1. Phase composition of the crushed zinc-containing material (data of the X-ray phase analysis)

Химическая формула	Объемная доля фазы, %	Плотность, г/см ³
$\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$	49	4,04
CaO	32	3,37
ZnO	9	5,61
Na_2O_2	9	2,80
TeO_2	1	5,67
SiO_2	< 0,01	2,65

Таблица 2. Гранулометрический состав измельченного цинксодержащего материала
Table 2. Granulometric composition of crushed zinc-containing material

Крупность частиц	Содержание, %
Более 100 мкм (+0,1 мм)	3,01
От 71 до 100 мкм (- 0,1 + 0,071 мм)	3,04
От 40 до 71 мкм (- 0,071 + 0,040 мм)	15,75
Менее 40 мкм (-0,040 мм)	78,20

Химический анализ металлургических пылей и спека с известняком выполнен атомно-эмиссионным спектральным методом с индуктивно-связанной плазмой (оборудование – спектрометр оптико-эмиссионный «Spectroblue») и атомно-эмиссионным спектральным методом с искровым источником возбуждения спектра (оборудование – спектрометр эмиссионный «Spectrolab M12»). Образцы пылей и спека также исследовали рентгенофазовым анализом на дифрактометре Bruker D8 Advance в диапазоне углов дифракции $2\theta = 15-80^\circ$ в излучении $\text{K}\alpha \text{Co}$ с шагом $0,025^\circ$ с использованием позиционно-чувствительного детектора LynxEye; общее время записи дифрактограммы 7,5 ч, эквивалентное время на шаг 1860 с. Качественный фазовый анализ выполнялся с исполь-

зованием пакета Bruker DiffracSuite EVA v6.0 и базы данных эталонных дифракционных спектров ICDD PDF-2 (v. 2019). Количественный фазовый анализ проводился в пакете полнопрофильного анализа Bruker TOPAS 5.0 по методу Ритвелда, кристаллические структуры взяты из базы данных Crystallography Open Database.

При выполнении работ по щелочному растворению цинка использовали *метод начальных скоростей* [26, 27], который позволяет не учитывать изменение поверхности частиц в навеске продукта и плотность оболочки продукта реакции в случае его образования, а также обеспечивает достаточный избыток реагента, используемого для выщелачивания.

Результаты исследования и их обсуждение

Ранее выполненными исследованиями по выщелачиванию спека едким натром, проведенными в статических условиях в следующих диапазонах исследованных параметров процесса: $C_0 = 0,202$ г-ион/дм³; 5-9 моль/дм³ NaOH; Ж/Т = 9; $V = 10-20$ рад/с; $T = 333-363$ К; $\tau = 0,5-2,5$ ч, было установлено, что процесс регулируется внешнедиффузионным механизмом переноса растворенных реагента и продуктов реакции через слой жидкости, примыкающий к поверхности частиц дисперсной фазы с энергией активации $E = 12,44$ кДж/моль. При увеличении концентрации щелочи до 10-12 моль/дм³ NaOH и понижении температуры системы до $T = 293-323$ К процесс образования труднорастворимых гидроксидов металлов-примесей и карбоната кальция в поверхностном слое частиц дисперсной фазы усиливается, существенно затрудняя взаимный перенос через малорастворимый слой исходных реагентов и продуктов реакции. В результате лимитирующей стадией выщелачивания цинка становится внутридиффузионный механизм с энергией активации $E = 22,1$ кДж/моль. При переходе от внешне- к внутридиффузионной стадии и отсутствии лимитирования процесса диффузионным переносом ($10 > C_{\text{NaOH}} > 9$ моль/дм³; $V \geq 20$ рад·с⁻¹; $T \geq 293$ К) возможна реализация кинетического механизма, когда скорость процесса определяется протеканием химической реакции растворения цинка.

Известно, что на скорость гетерогенной химической реакции влияет объемная концентрация твердой фазы S/V (близкое по смыслу Т/Ж), определяющая запись и размерность константы скорости реакции в уравнении первого порядка [28, 29]:

$$\ln \left[\frac{C_0}{C_0 - C} \right] = p \cdot \tau = k \cdot \left(\frac{S}{V} \right) \cdot \tau; \quad (1)$$

$$\ln \left[\frac{Q_0}{Q_0 - Q} \right] = k \cdot S \cdot \tau, \quad (2)$$

где k – константа скорости реакции, дм·с⁻¹; C_0/Q_0 – концентрация/количество выщелачиваемого элемента

в пульпе, моль(г-ион)/дм³; C/Q – концентрация/количество выщелачиваемого элемента в растворе, моль(г-ион)/дм³; S – площадь дисперсной фазы, дм²; V – объем пульпы, дм³; τ – продолжительность процесса, с.

Скорость реакции v , моль(г-ион)·дм⁻³·с⁻¹, можно рассчитать по концентрации/количеству продукта реакции. Для оценки кинетики также использовали «удельные» скорости $v_{\text{уд}}$, моль(г-ион)·дм⁻²·с⁻¹:

$$v_{\text{уд}} = \frac{dC / d\tau}{S / V} = \frac{dC}{d\tau} \cdot \frac{V}{S}; \quad (3)$$

$$v_{\text{уд}} = \frac{dQ}{d\tau} \cdot \frac{1}{S}. \quad (4)$$

Для определения энергии активации гетерогенной химической реакции E , Дж/моль, использовали уравнение Аррениуса:

$$\ln k = \ln k_0 - \left(\frac{E}{RT} \right), \quad (5)$$

$$k = k_0 \cdot e^{-\frac{E}{RT}}, \quad (6)$$

где k_0 – предэкспоненциальный множитель, дм·с⁻¹; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T – температура, К.

$$E = \frac{R \cdot \ln(k_2 / k_1) \cdot T_1 \cdot T_2}{T_2 - T_1}. \quad (7)$$

Энергию активации можно определить графическим способом, для чего в координатах « $\ln k - 1/T$ » строят прямолинейную зависимость, для которой определяют величину тангенса угла наклона $\text{tg} \gamma$, К⁻¹:

$$E = R \cdot \text{tg} \gamma. \quad (8)$$

Величина энергии активации E не зависит от температуры, её численное значение определяется характером исследуемого процесса.

В ходе проведенных исследований установлено, что степень выщелачивания цинка α из спека пыли электродуговых печей с известняком (рис. 1) возрастает по мере увеличения исходного количества цинка Q_0 . Количество металла в растворе Q определяется объемной концентрацией твердой фазы S/V , когда при постоянном объеме пульпы количество растворенного цинка пропорционально площади твердой фазы S (рис. 2).

Скорости выщелачивания $d\alpha/d\tau$ и увеличения количества цинка в растворе $dQ/d\tau$ для начальных участков кинетических кривых ($\alpha \leq 0,3$) $d\alpha/d\tau = (1,0-1,29) \cdot 10^{-3}$ с⁻¹, $dQ/d\tau = (0,9-2,65) \cdot 10^{-4}$ г-ион·с⁻¹ превышают на порядок аналогичные показатели по мере увеличения продолжительности процесса ($\alpha > 0,3$), а именно: $d\alpha/d\tau = (0,9-1,19) \cdot 10^{-4}$ с⁻¹, $dQ/d\tau = (0,8-2,4) \cdot 10^{-5}$ г-ион·с⁻¹ (табл. 3).

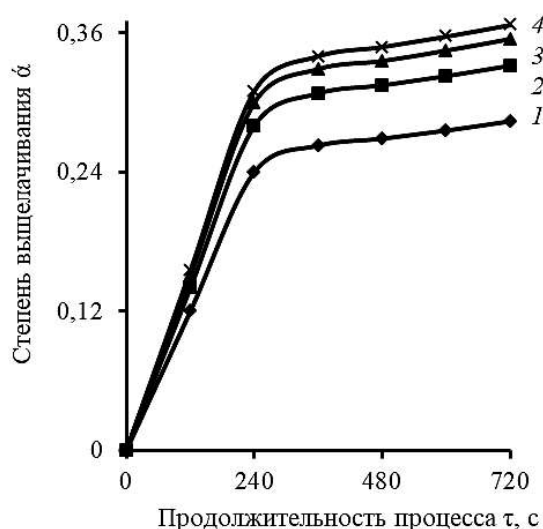


Рис. 1. Кинетические кривые выщелачивания цинка едким натром по мере увеличения Q_0 , г-ион: 0,091 (1), 0,114 (2), 0,159 (3), 0,205 (4) (9,2 моль/дм³ NaOH; $V = 20$ рад·с⁻¹, $T = 333$ К)
 Fig. 1. Kinetic curves of zinc leaching with caustic soda with an increase in Q_0 , g-ion: 0.091 (1); 0.114 (2); 0.159 (3); 0.205 (4) (9.2 mol/dm³ NaOH; $V = 20$ rad·s⁻¹, $T = 333$ K)

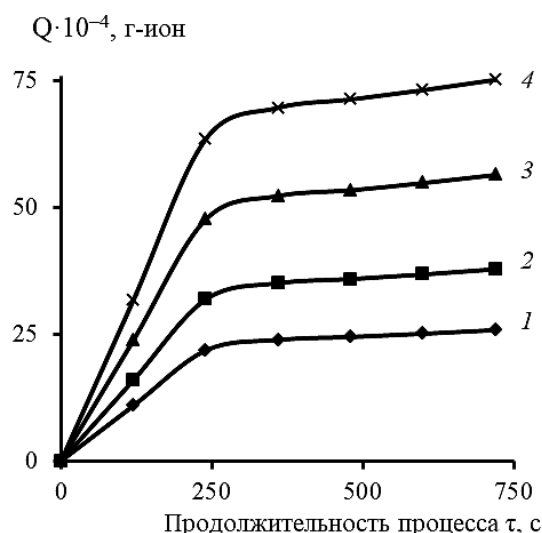


Рис. 2. Зависимость количества растворенного цинка от продолжительности при площади поверхности S , дм²: 547 (1), 684 (2), 957 (3), 1231 (4) (9,2 моль/дм³ NaOH; $V = 20$ рад·с⁻¹; $T = 333$ К)
 Fig. 2. Dependence between the amount of dissolved zinc and the duration at surface area S , dm²: 547 (1); 684 (2); 957 (3); 1231 (4) (9.2 mol/dm³ NaOH; $V = 20$ rad·s⁻¹, $T = 333$ K)

Таблица 3. Показатели процесса выщелачивания спека с различным количеством цинка Q_0 и площадью поверхности S

Table 3. Leaching process parameters of the sinter with different amounts of zinc Q_0 and surface area S

Q_0 , г-ион	$d\alpha/d\tau$, с ^{-1*}	S , дм ²	$dQ/d\tau$, г-ион·с ⁻¹	NaOH, моль/дм ³	T , К	V , рад·с ⁻¹
0,091	$1,0 \cdot 10^{-3}$	547,1	$0,91 \cdot 10^{-4}$	9,2	333	20
0,114	$1,167 \cdot 10^{-3}$	684	$1,33 \cdot 10^{-4}$			
0,159	$1,25 \cdot 10^{-3}$	957	$1,988 \cdot 10^{-4}$			
0,205	$1,292 \cdot 10^{-3}$	1231	$2,648 \cdot 10^{-4}$			
Q_0 , г-ион	$d\alpha/d\tau$, с ^{-1**}	S , дм ²	$dQ/d\tau$, г-ион·с ⁻¹			
0,091	$0,917 \cdot 10^{-4}$	547,1	$0,833 \cdot 10^{-5}$			
0,114	$1,083 \cdot 10^{-4}$	684	$1,235 \cdot 10^{-5}$			
0,159	$1,146 \cdot 10^{-4}$	957	$1,821 \cdot 10^{-5}$			
0,205	$1,187 \cdot 10^{-4}$	1231	$2,433 \cdot 10^{-5}$			

* Для начального участка кинетических кривых ($\alpha \leq 0,3$).

** Для участка кинетических кривых ($\alpha > 0,3$).

Графический способ определения значений удельной скорости выщелачивания цинка из спека $v_{уд}$ сводится к построению прямолинейных зависимостей в координатах « $dQ/dS - \tau$ », тангенс угла наклона которых соответствует $\text{tg}\varphi = dQ/dS \cdot \tau = v_{уд}$ (рис. 3). Удельная скорость растворения цинка возрастает в диапазоне $(1,66-2,15) \cdot 10^{-7}$ г-ион/дм²·с при увеличении значений поверхности дисперсной фазы $S = 547-1231$ дм² пропорционально изменению объемной концентрации твердой фазы S/V (табл. 4).

Степень выщелачивания цинка α из спека возрастает по мере увеличения температуры процесса в интервале 333-363 К (рис. 4). Скорость растворения цинка $d\alpha/d\tau$ для начальных участков кинетических кривых ($\alpha \leq 0,3$) $d\alpha/d\tau = (1,3-3,0) \cdot 10^{-3}$ с⁻¹ на порядок

превышает аналогичные показатели по мере увеличения продолжительности процесса ($\alpha > 0,3$), а именно $d\alpha/d\tau = (1,19-2,77) \cdot 10^{-4}$ с⁻¹ (табл. 5).

Графический способ определения значений удельной скорости выщелачивания цинка из спека $v_{уд}$ в зависимости от температуры сводится к построению прямолинейных зависимостей в координатах « $dQ/dS - \tau$ », тангенс угла наклона которых соответствует $\text{tg}\varphi = dQ/dS \cdot \tau = v_{уд}$ (рис. 5). Удельная скорость растворения цинка возрастает в диапазоне $(2,15-5,0) \cdot 10^{-7}$ г-ион/дм²·с ($\alpha \leq 0,3$) и $(1,98-4,6) \cdot 10^{-8}$ г-ион/дм²·с ($\alpha > 0,3$) при увеличении значений температуры $T = 333-363$ К (см. табл. 5). Константа скорости реакции растворения цинка возрастает: $k = (1,26-4,34) \cdot 10^{-6}$ дм/с (табл. 6).

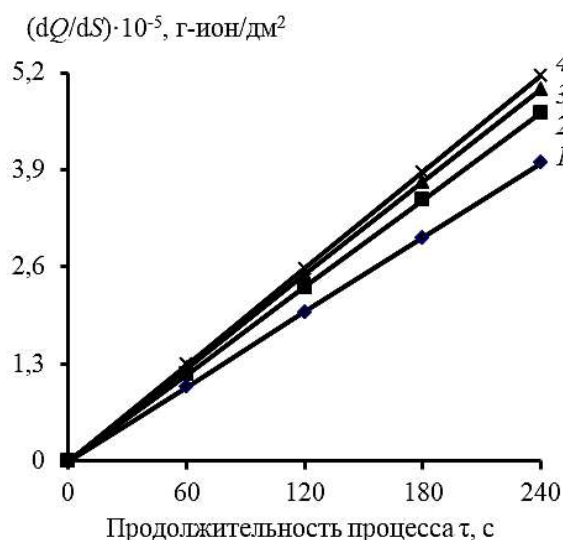


Рис. 3. Зависимость параметра dQ/dS от продолжительности растворения цинка и значений S , дм^2 : 547 (1), 684 (2), 957 (3), 1231 (4) ($9,2 \text{ моль/дм}^3 \text{ NaOH}$; $V = 20 \text{ рад}\cdot\text{с}^{-1}$; $T = 333 \text{ К}$)

Fig. 3. Dependence between the dQ/dS parameter and the duration of zinc dissolution and S , дм^2 : 547 (1); 684 (2); 957 (3); 1231 (4) ($9.2 \text{ mol/dm}^3 \text{ NaOH}$; $V = 20 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $T = 333 \text{ K}$)

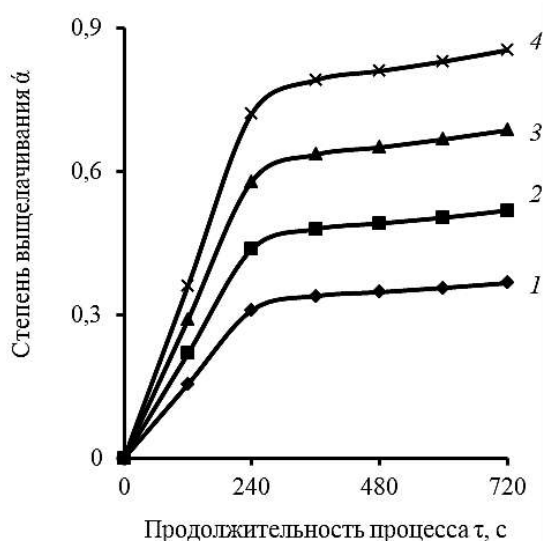


Рис. 4. Кинетические кривые выщелачивания цинка едким натром по мере увеличения температуры T , К: 333 (1), 343 (2), 353 (3), 363 (4) ($9,2 \text{ моль/дм}^3 \text{ NaOH}$; $V = 20 \text{ рад}\cdot\text{с}^{-1}$, $S = 1231 \text{ дм}^2$)

Fig. 4. Kinetic curves of zinc leaching with caustic soda with an increase in T , К: 333 (1); 343 (2); 353 (3); 363 (4) ($9.2 \text{ mol/dm}^3 \text{ NaOH}$; $V = 20 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $S = 1231 \text{ dm}^2$)

Таблица 4. Показатели процесса выщелачивания спека с различной площадью поверхности S
Table 4. Leaching process parameters of the sinter with different surface area S

S , дм^2	$dQ/dS \cdot \tau = v_{\text{уд}} = \text{tg}\varphi$, г-ион/ $\text{дм}^2 \cdot \text{с}$	NaOH, моль/ дм^3	T , К	V , рад·с $^{-1}$
547,1	$1,663 \cdot 10^{-7}$	9,2	333	20
684	$1,944 \cdot 10^{-7}$			
957	$2,077 \cdot 10^{-7}$			
1231	$2,151 \cdot 10^{-7}$			

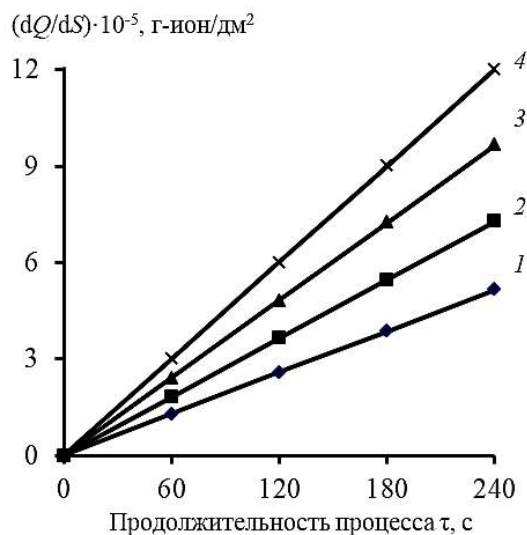


Рис. 5. Зависимость параметра dQ/dS от продолжительности растворения цинка и увеличения температуры T , К: 333 (1), 343 (2), 353 (3), 363 (4) ($9,2 \text{ моль/дм}^3 \text{ NaOH}$; $V = 20 \text{ рад}\cdot\text{с}^{-1}$; $S = 1231 \text{ дм}^2$)

Fig. 5. Dependence between dQ/dS and the duration of zinc dissolution and an increase in temperature T , К: 333 (1); 343 (2); 353 (3); 363 (4) ($9.2 \text{ mol/dm}^3 \text{ NaOH}$; $V = 20 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $S = 1231 \text{ dm}^2$)

Для вычисления энергии активации процесса выщелачивания цинка из спека определяют тангенс угла наклона линейной зависимости, построенной в координатах « $\ln k - 1/T$ », который равен $\text{tg}\gamma = 5 \cdot 10^3$ (рис. 6). Значение энергии активации $E = R \cdot \text{tg}\gamma = 8,314 \cdot 5 \cdot 10^3 = 4,168 \cdot 10^4 \text{ Дж/моль}$, что по данному показателю соответствует протеканию процесса растворения цинка из спека в кинетической области.

Таким образом, при отсутствии лимитирования процесса диффузионным переносом ($C_{\text{NaOH}} = 9,2 \text{ моль/дм}^3$, $V = 20 \text{ рад}\cdot\text{с}^{-1}$, $T = 333 \text{ К}$) при увеличении объемной концентрации цинксодержащего спека $S/V = (1,216 - 2,736) \cdot 10^3 \text{ дм}^{-1}$ выщелачивание подчиняется кинетическому механизму, когда скорость процесса определяется протеканием химической реакции растворения цинка с энергией активации $41,57 \text{ кДж/моль}$.

Таблица 5. Показатели процесса выщелачивания спека с различной температурой T
 Table 5. Leaching process parameters of the sinter with different temperature T

T, K	$d\dot{a}/d\tau, c^{-1} *$	$dQ/dS \cdot \tau = v_{уд} = tg\lambda$	NaOH, моль/дм ³	$S, дм^2$	$V, рад \cdot c^{-1}$
333	$1,292 \cdot 10^{-3}$	$2,151 \cdot 10^{-7}$	9,2	1231	20
343	$1,825 \cdot 10^{-3}$	$3,038 \cdot 10^{-7}$			
353	$2,417 \cdot 10^{-3}$	$4,025 \cdot 10^{-7}$			
363	$3,008 \cdot 10^{-3}$	$5,013 \cdot 10^{-7}$			
T, K	$d\dot{a}/d\tau, c^{-1} **$	$dQ/dS \cdot \tau$			
333	$1,187 \cdot 10^{-4}$	$1,975 \cdot 10^{-8}$			
343	$1,688 \cdot 10^{-4}$	$2,807 \cdot 10^{-8}$			
353	$2,229 \cdot 10^{-4}$	$3,708 \cdot 10^{-8}$			
363	$2,771 \cdot 10^{-4}$	$4,609 \cdot 10^{-8}$			

* Для начального участка кинетических кривых ($\dot{a} \leq 0,3$).

** Для участка кинетических кривых ($\dot{a} > 0,3$).

Таблица 6. Показатели процесса выщелачивания спека с различной температурой T
 Table 6. Leaching process parameters of the sinter with different temperature T

T, K	$k, дм/с$	$E, Дж/моль$	$tg\gamma, K^{-1}$	$k_0, дм/с$	Параметры процесса
333	$1,256 \cdot 10^{-6}$	$4,157 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^3$	4,168	9,2 моль/дм ³ NaOH $S = 1231 дм^2$ $V = 20 рад \cdot c^{-1}$
343	$1,949 \cdot 10^{-6}$				
353	$2,937 \cdot 10^{-6}$				
363	$4,338 \cdot 10^{-6}$				

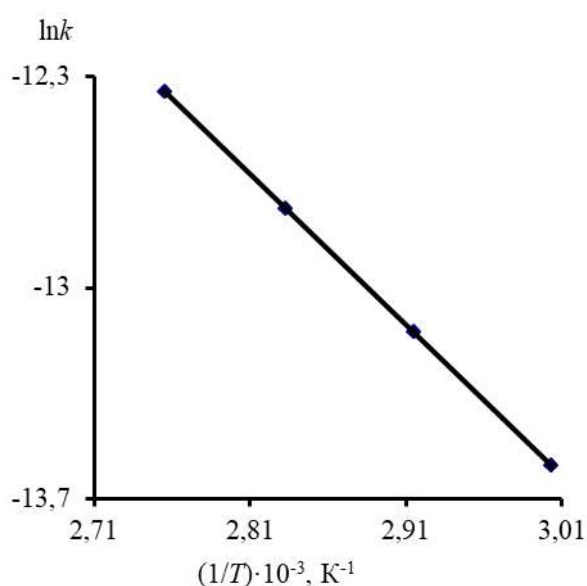


Рис. 6. Зависимость логарифма константы скорости реакции $\ln k$ от обратной температуры $1/T$ при выщелачивании цинка из спека ($tg\gamma = 5,0 \cdot 10^3, K^{-1}, E = 4,157 \cdot 10^4$ Дж/моль, $k_0 = 4,168$ дм/с)

Fig. 6. Dependence between the logarithm of the $\ln k$ reaction rate constant and inverse temperature $1/T$ during zinc leaching from the sinter ($tg\gamma = 5,0 \cdot 10^3, K^{-1}; E = 4,157 \cdot 10^4$ J/mol; $k_0 = 4,168$ dm/s)

Заключение

Полученные сведения о кинетике выщелачивания цинка из спека пыли электродуговых печей с известняком позволяют определить пути интенсификации процесса, предусматривающие: дополнительное измельчение твердой фазы перед обработкой щелочью для увеличения её удельной поверхности; периодическое или непрерывное активирование поверхности частиц дисперсной фазы в процессе выщелачивания для снятия пленки побочных продуктов реакции – гидроксидов металлов-примесей и карбоната кальция; повышение температуры пульпы; перевод извлекаемого целевого элемента в форму хорошо растворимого соединения.

Список источников

1. The selective alkaline leaching of zinc oxide from Electric Arc Furnace dust pre-treated with calcium oxide / Chairaksa-Fujimoto R., Maruyama K., Miki T., Nagasaka T. // Hydrometallurgy. 2016, vol. 159, pp. 120-125. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.11.009>
2. Hydrometallurgical processing of carbon steel EAF dust / Havlík T., Souza B.V., Bernardes A.M., Schneider I.A.H. // Journal of Hazardous Materials. 2006, vol. 135, iss. 1-3, pp. 311-318. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.11.067>
3. Pickles C.A. Thermodynamic modelling of the formation of zinc-manganese ferrite spinel in electric arc furnace dust // Journal of Hazardous Materials. 2010, vol. 179, iss. 1-3, pp. 309-317. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.03.005>

4. Martins F.M., Neto J.M.R., Cunha C.J. Mineral phases of weathered and recent electric arc furnace dust // *Journal of Hazardous Materials*. 2008, vol. 154, iss. 1-3, pp. 417-425. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.10.041>
5. Orhan G. Leaching and cementation of heavy metals from electric arc furnace dust in alkaline medium // *Hydrometallurgy*. 2005, vol. 78, iss. 3-4, pp. 236-245. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2005.03.002>
6. Long and short-term performance of a stabilized/solidified electric arc furnace dust / Pereira C.F., Galiano Y.L., Rodríguez-Piñero M.A., Parapar J.V. // *Journal of Hazardous Materials*. 2007, vol. 148, iss. 3, pp. 701-707. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.03.034>
7. Dutra A.J.B., Paiva P.R.P., Tavares L.M. Alkaline leaching of zinc from electric arc furnace steel dust // *Minerals Engineering*. 2006, vol. 19, iss. 5, pp. 478-485. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2005.08.013>
8. Hydrometallurgical process for zinc recovery from electric arc furnace dust (EAFD): Part I: Characterization and leaching by diluted sulphuric acid / Oustadakis P., Tsakiridis P.E., Katsiapi A., Agatzini-Leonardou S. // *Journal of Hazardous Materials*. 2010, vol. 179, iss. 1-3, pp. 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.01.059>
9. Leclerc N., Meux E., Lecuire J.-M. Hydrometallurgical extraction of zinc from zinc ferrites // *Hydrometallurgy*. 2003, vol. 70, iss. 1-3, pp. 175-183. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(03\)00079-3](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(03)00079-3)
10. Recycling of an electric arc furnace flue dust to obtain high grade ZnO / Ruiz O., Clemente C., Alonso M., Alguacil F.J. // *Journal of Hazardous Materials*. 2007, vol. 141, iss. 1, pp. 33-36. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.06.079>
11. Pickles C.A. Thermodynamic analysis of the selective carbothermic reduction of electric arc furnace dust // *Journal of Hazardous Materials*. 2008, vol. 150, iss. 2, pp. 265-278. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.04.097>
12. Pickles C.A. Thermodynamic analysis of the selective chlorination of electric arc furnace dust // *Journal of Hazardous Materials*. 2009, vol. 166, iss. 2-3, pp. 1030-1042. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.11.110>
13. Gunter M., Vopel K.-H., Janssen W. Untersuchungen zur verwertung von stauben und schlammern aus den abgasreinigungen von hochofen- und blasstahlwerken im drehrohrofen // *Stahl und Eisen*. 1976, vol. 96, no. 24, pp. 1228-1238.
14. Caravaca C., Cobo A., Alguacil F.J. Considerations about the recycling of EAF flue dusts as source for the recovery of valuable metals by hydrometallurgical processes // *Resources, Conservation and Recycling*. 1994, vol. 10, iss. 1-2, pp. 35-41. [https://doi.org/10.1016/0921-3449\(94\)90036-1](https://doi.org/10.1016/0921-3449(94)90036-1)
15. Cruells M., Roca A., Núnñez C. Electric arc furnace flue dusts: characterization and leaching with sulphuric acid // *Hydrometallurgy*. 1992, vol. 31, iss. 3, pp. 213-231. [https://doi.org/10.1016/0304-386X\(92\)90119-K](https://doi.org/10.1016/0304-386X(92)90119-K)
16. Langová Š., Leško J., Matýsek D. Selective leaching of zinc from zinc ferrite with hydrochloric acid // *Hydrometallurgy*. 2009, vol. 95, iss. 3-4, pp. 179-182. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2008.05.040>
17. Citric acid as an alternative lixiviant for zinc oxide dissolution / Larba R., Boukerche I., Alane N., Habbache N., Djerad S., Tifouti L. // *Hydrometallurgy*. 2013, vol. 134-135, pp. 117-123. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2013.02.002>
18. Atmospheric leaching of EAF dust with diluted sulphuric acid / Havlik T., Turzakova M., Stopic S., Friedrich B. // *Hydrometallurgy*. 2005, vol. 77, iss. 1-2, pp. 41-50. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2004.10.008>
19. Yoshida T. Leaching of zinc oxide in acidic solution // *Materials Transactions*. 2003, vol. 44, no. 12, pp. 2489-2493. <https://doi.org/10.2320/matertrans.44.2489>
20. Özverdi A., Erdem M. Environmental risk assessment and stabilization/solidification of zinc extraction residue: I. Environmental risk assessment // *Hydrometallurgy*. 2010, vol. 100, iss. 3-4, pp. 103-109. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2009.10.011>
21. Cruells M., Roca A., Núnñez C. Electric arc furnace flue dusts: characterization and leaching with sulphuric acid // *Hydrometallurgy*. 1992, vol. 31, iss. 3, pp. 213-231. [https://doi.org/10.1016/0304-386X\(92\)90119-K](https://doi.org/10.1016/0304-386X(92)90119-K)
22. Langová Š., Riplová J., Vallová S. Atmospheric leaching of steel-making wastes and the precipitation of goethite from the ferric sulphate solution // *Hydrometallurgy*. 2007, vol. 87, no. 3-4, pp. 157-162. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2007.03.002>
23. Hydrometallurgical process for zinc recovery from electric arc furnace dust (EAFD). Part II: downstream processing and zinc recovery by electrowinning // Tsakiridis P.E., Oustadakis P., Katsiapi A., Agatzini-Leonardou S. // *Journal of Hazardous Materials*. 2010, vol. 179, iss. 1-3, pp. 8-14. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.04.004>
24. Langová Š., Matýsek D. Zinc recovery from steel-making wastes by acid pressure leaching and hematite precipitation // *Hydrometallurgy*. 2010, vol. 101, iss. 3-4, pp. 171-173. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2010.01.003>
25. Zinc recovery from purified electric arc furnace dust leach liquors by chemical precipitation / Xanthopoulos P., Agatzini-Leonardou S., Oustadakis P., Tsakiridis P.E. // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2017, vol. 5, iss. 4, pp. 3550-3559. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.07.023>
26. Кинетика выщелачивания галлия серной кислотой из фосфорсодержащего продукта / Касымова А.С., Абишева З.С., Жумартбаев Э.У., Пономарева Е.И. // *Известия вузов. Цветная металлургия*. 1990. №6. С. 72-75.
27. Кинетика выщелачивания цинка из шлака свинцо-

во-медного производства / Чиркст Д.Э., Черемисина О.В., Чистяков А.А., Баян Г.А. // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2006. Т. 49. №10. С. 35-38.

28. Каковский И.А., Поташников Ю.М. Кинетика процессов растворения. М.: Металлургия, 1975. 224 с.
29. Каковский И.А., Набойченко С.С. Термодинамика и кинетика гидрометаллургических процессов. Алма-Ата: Наука, 1986. 272 с.

References

1. Chairaksa-Fujimoto R., Maruyama K., Miki T., Nagasaka T. The selective alkaline leaching of zinc oxide from electric arc furnace dust pre-treated with calcium oxide. *Hydrometallurgy*. 2016;159:120-125. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.11.009>
2. Havlík T., Souza B.V., Bernardes A.M., Schneider I.A.H. Hydrometallurgical processing of carbon steel EAF dust. *Journal of Hazardous Materials*. 2006;135(1-3):311-318. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.11.067>
3. Pickles C.A. Thermodynamic modelling of the formation of zinc-manganese ferrite spinel in electric arc furnace dust. *Journal of Hazardous Materials*. 2010;179(1-3):309-317. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.03.005>
4. Martins F.M., Neto J.M.R., Cunha C.J. Mineral phases of weathered and recent electric arc furnace dust. *Journal of Hazardous Materials*. 2008;154(1-3):417-425. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.10.041>
5. Orhan G. Leaching and cementation of heavy metals from electric arc furnace dust in alkaline medium. *Hydrometallurgy*. 2005;78(3-4):236-245. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2005.03.002>
6. Pereira C.F., Galiano Y.L., Rodríguez-Piñero M.A., Parapar J.V. Long and short-term performance of a stabilized/solidified electric arc furnace dust. *Journal of Hazardous Materials*. 2007;148(3):701-707. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.03.034>
7. Dutra A.J.B., Paiva P.R.P., Tavares L.M. Alkaline leaching of zinc from electric arc furnace steel dust. *Minerals Engineering*. 2006;19(5):478-485. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2005.08.013>
8. Oustadakis P., Tsakiridis P.E., Katsiapi A., Agatzini-Leonardou S. Hydrometallurgical process for zinc recovery from electric arc furnace dust (EAFD): Part I: Characterization and leaching by diluted sulphuric acid. *Journal of Hazardous Materials*. 2010;179(1-3):1-7. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.01.059>
9. Leclerc N., Meux E., Lecuire J.-M. Hydrometallurgical extraction of zinc from zinc ferrites. *Hydrometallurgy*. 2003;70(1-3):175-183. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(03\)00079-3](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(03)00079-3)
10. Ruiz O., Clemente C., Alonso M., Alguacil F.J. Recycling of an electric arc furnace flue dust to obtain high grade ZnO. *Journal of Hazardous Materials*. 2007;141(1):33-36. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.06.079>
11. Pickles C.A. Thermodynamic analysis of the selective carbothermic reduction of electric arc furnace dust. *Journal of Hazardous Materials*. 2008;150(2):265-278. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.04.097>
12. Pickles C.A. Thermodynamic analysis of the selective chlorination of electric arc furnace dust. *Journal of Hazardous Materials*. 2009;166(2-3):1030-1042. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.11.110>
13. Gunter M., Vopel K.-H., Janssen W. Untersuchungen zur Verwertung von Stauben und Schlammern aus den Abgasreinigungen von Hochofen- und Blasstahlwerken im Drehrohrofen. *Stahl und Eisen*. 1976;96(24):1228-1238.
14. Caravaca C., Cobo A., Alguacil F.J. Considerations about the recycling of EAF flue dusts as source for the recovery of valuable metals by hydrometallurgical processes. *Resources, Conservation and Recycling*. 1994;10(1-2):35-41. [https://doi.org/10.1016/0921-3449\(94\)90036-1](https://doi.org/10.1016/0921-3449(94)90036-1)
15. Cruells M., Roca A., Núnñez C. Electric arc furnace flue dusts: characterization and leaching with sulphuric acid. *Hydrometallurgy*. 1992;31(3):213-231. [https://doi.org/10.1016/0304-386X\(92\)90119-K](https://doi.org/10.1016/0304-386X(92)90119-K)
16. Langová Š., Leško J., Matýsek D. Selective leaching of zinc from zinc ferrite with hydrochloric acid. *Hydrometallurgy*. 2009;95(3-4):179-182. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2008.05.040>
17. Larba R., Boukerche I., Alane N., Habbache N., Djerad S., Tifouti L. Citric acid as an alternative lixiviant for zinc oxide dissolution. *Hydrometallurgy*. 2013;134-135:117-123. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2013.02.002>
18. Havlík T., Turzakova M., Stopic S., Friedrich B. Atmospheric leaching of EAF dust with diluted sulphuric acid. *Hydrometallurgy*. 2005;77(1-2):41-50. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2004.10.008>
19. Yoshida T. Leaching of zinc oxide in acidic solution. *Materials Transactions*. 2003;44(12):2489-2493. <https://doi.org/10.2320/matertrans.44.2489>
20. Özverdi A., Erdem M. Environmental risk assessment and stabilization/solidification of zinc extraction residue: I. Environmental risk assessment. *Hydrometallurgy*. 2010;100(3-4):103-109. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2009.10.011>
21. Cruells M., Roca A., Núnñez C. Electric arc furnace flue dusts: characterization and leaching with sulphuric acid. *Hydrometallurgy*. 1992;31(3):213-231. [https://doi.org/10.1016/0304-386X\(92\)90119-K](https://doi.org/10.1016/0304-386X(92)90119-K)
22. Langová Š., Riplová J., Vallová S. Atmospheric leaching of steel-making wastes and the precipitation of goethite from the ferric sulphate solution. *Hydrometallurgy*. 2007;87(3-4):157-162. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2007.03.002>
23. Tsakiridis P.E., Oustadakis P., Katsiapi A., Agatzini-Leonardou S. Hydrometallurgical process for zinc recovery from electric arc furnace dust (EAFD). Part II: downstream processing and zinc recovery by electrowinning. *Journal of Hazardous Materials*.

- 2010;179(1-3):8-14. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.04.004>
24. Langová Š., Matýsek D. Zinc recovery from steel-making wastes by acid pressure leaching and hematite precipitation. *Hydrometallurgy*. 2010;101(3-4):171-173. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2010.01.003>
25. Xanthopoulos P., Agatzini-Leonardou S., Oustadakis P., Tsakiridis P.E. Zinc recovery from purified electric arc furnace dust leach liquors by chemical precipitation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2017;5(4):3550-3559. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.07.023>
26. Kasyanova A.S., Abisheva Z.S., Zhumartbaev E.U., Ponomareva E.I. Kinetics of gallium leaching with sulfuric acid from a phosphorus-containing product. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya* [News of Universities. Non-Ferrous Metallurgy]. 1990;(6):72-75. (In Russ.)
27. Chirkst D.E., Cheremisina O.V., Chistyakov A.A., Balyan G.A. Kinetics of zinc leaching from lead-copper slag. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [News of Universities. Chemistry and Chemical Technology]. 2006;49(10):35-38. (In Russ.)
28. Kakovsky I.A., Potashnikov Yu.M. *Kinetika protsessov rastvoreniya* [Kinetics of dissolution processes]. Moscow: Metallurgy, 1975, 224 p. (In Russ.)
29. Kakovsky I.A., Naboichenko S.S. *Termodinamika i kinetika gidrometallurgicheskikh protsessov* [Thermodynamics and kinetics of hydrometallurgical processes]. Alma-Ata: Nauka, 1986, 272 p. (In Russ.)

Поступила 04.12.2023; принята к публикации 12.01.2024; опубликована 28.03.2024
Submitted 04/12/2023; revised 12/01/2024; published 28/03/2024

Якорнов Сергей Александрович – кандидат технических наук, первый заместитель технического директора ОАО «Уральская горно-металлургическая компания», Верхняя Пышма, Россия.
Email: s.yakornov@uralmine.com. ORCID 0000-0002-2507-3279

Мальцев Геннадий Иванович – доктор технических наук, старший научный сотрудник, главный специалист Исследовательского центра, АО «Уралэлектромедь», Верхняя Пышма, Россия.
Email: mgi@uralcopper.com. ORCID 0000-0002-0750-0070

Воинков Роман Сергеевич – кандидат технических наук, начальник Исследовательского центра, АО «Уралэлектромедь», Верхняя Пышма, Россия; доцент кафедры металлургии, Технический университет УГМК, Верхняя Пышма, Россия.
Email: R.Voinkov@uralcopper.com. ORCID 0000-0001-6697-1596

Гребнева Анна Александровна – кандидат химических наук, ведущий инженер-технолог Исследовательского центра, АО «Уралэлектромедь», Верхняя Пышма, Россия.
Email: vs_finder@mail.ru. ORCID 0009-0001-5605-1443

Sergey A. Yakornov – PhD (Eng.), First Deputy Technical Director, OJSC Ural Mining and Metallurgical Company, Verkhnyaya Pyshma, Russia.
Email: s.yakornov@uralmine.com. ORCID 0000-0002-2507-3279

Gennady I. Maltsev – DrSc (Eng.), Senior Researcher, Chief Specialist of the Research Center, JSC Uralektromed, Verkhnyaya Pyshma, Russia.
Email: mgi@uralcopper.com. ORCID 0000-0002-0750-0070

Roman S. Voinkov – PhD (Eng.), Head of the Research Center, JSC Uralektromed, Verkhnyaya Pyshma, Russia; Associate Professor of the Metallurgy Department, UMMC Technical University, Verkhnyaya Pyshma, Russia.
Email: R.Voinkov@uralcopper.com. ORCID 0000-0001-6697-1596

Anna A. Grebneva – PhD (Chemistry), Lead Process Engineer of the Research Center, JSC Uralektromed, Verkhnyaya Pyshma, Russia.
Email: vs_finder@mail.ru. ORCID 0009-0001-5605-1443



ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕСЧАНО-ЖИДКОСТЕКОВЫХ ЛИТЕЙНЫХ СТЕРЖНЕЙ

Гутько Ю.И., Войтенко В.В.

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

Аннотация. Постановка задачи. Песчано-жидкостекольные литейные стержни по-прежнему широко применяются в чугунном промышленном и художественном литье вследствие доступности и простоты реализации песчано-жидкостекольного стержневого процесса, а также безопасности компонентов стержневой смеси и газообразного отвердителя для здоровья человека и окружающей среды. Совершенствование песчано-жидкостекольного стержневого процесса заключается в поиске новых добавок и рецептур стержневых смесей, а также улучшении способов отверждения литейных стержней для повышения их физико-технических характеристик и эксплуатационных качеств. В процессе изготовления металлических отливок на литейные стержни длительное время воздействуют высокие температуры, приводящие к изменению их физико-технических характеристик во времени, что влияет на качество отливок. Поэтому установление температурных зависимостей физико-технических характеристик песчано-жидкостекольных литейных стержней различных составов является актуальной научно-технической задачей. **Цель работы.** Разработка комплексной математической модели, описывающей температурные зависимости физико-технических характеристик песчано-жидкостекольных литейных стержней, путем усовершенствования существующих математических моделей с учетом результатов экспериментальных исследований. **Используемый метод.** Математическое моделирование температурных зависимостей физико-технических характеристик песчано-жидкостекольных литейных стержней при воздействии высоких температур в процессе изготовления металлических отливок. **Новизна.** Предложена математическая модель, отражающая температурные зависимости физико-технических характеристик песчано-жидкостекольных литейных стержней с учетом перспективных рецептур стержневых смесей. **Результат.** Показана возможность численного моделирования физико-технических характеристик песчано-жидкостекольных литейных стержней при подборе рецептуры стержневой смеси для решения конкретной задачи. **Практическая значимость.** Приведены результаты численных экспериментов с использованием предложенной математической модели для исследования физико-технических характеристик песчано-жидкостекольных литейных стержней различных составов при воздействии высоких температур с учетом тепловых процессов, протекающих в литейной форме, заполненной расплавленным металлическим литейным материалом, с установленными литейными стержнями.

Ключевые слова: литейный стержень, литейная форма, математическая модель, физико-технические характеристики, стержневая смесь, предел прочности, выбиваемость, численный эксперимент, рецептура, коэффициент газопроницаемости, газовыделение, теплоемкость, плотность, теплопроводность

© Гутько Ю.И., Войтенко В.В., 2024

Для цитирования

Гутько Ю.И., Войтенко В.В. Исследование температурных зависимостей физико-технических характеристик песчано-жидкостекольных литейных стержней // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №1. С. 39-48. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-39-48>



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

STUDY ON TEMPERATURE DEPENDENCES FOR PHYSICAL AND TECHNICAL CHARACTERISTICS OF FOUNDRY SODIUM SILICATE SAND CORES

Gutko Yu.I., Voytenko V.V.

Vladimir Dal Lugansk State University, Lugansk, Lugansk People's Republic, Russia

Abstract. Problem Statement. Foundry sodium silicate sand cores are still widely used in the iron industrial and art castings due to accessibility and ease of implementation of the sodium silicate sand core-making process as well as safety of components in a core mixture and a gaseous hardener for human health and the environment. Improvement of the sodium silicate sand core-making process involves a search for new additives and compositions of core mixtures, enhancement of methods for curing foundry cores to improve their technical characteristics, physical properties, and performance qualities. During production of metal castings, foundry cores are for a long time exposed to high temperatures, resulting in changes in their technical characteristics and physical properties over time, and influencing the quality of castings. Therefore, determination of temperature dependences for physical and technical characteristics of foundry sodium silicate sand cores based on various compositions is an issue of current interest in science and technology. **Objective.** The study is aimed at developing an integrated mathematical model describing temperature dependences for physical and technical characteristics of foundry sodium silicate sand cores by improving existing mathematical models, considering results of experimental studies. **Method Applied.** The authors applied mathematical modeling of temperature dependences for physical and technical characteristics of foundry sodium silicate sand cores at high temperatures during production of metal castings. **Originality.** The paper presents a proposed mathematical model reflecting temperature dependences for physical and technical characteristics of foundry sodium silicate sand cores, considering promising compositions of core mixtures. **Result.** The paper demonstrates a possibility of numerical modeling of physical and technical characteristics of foundry sodium silicate sand cores, when choosing a composition for a core mixture to solve a specific problem. **Practical Relevance.** The paper presented results of numerical experiments using the proposed mathematical model to study physical and technical characteristics of foundry sodium silicate sand cores based on various compositions at high temperatures, considering thermal processes occurring in a foundry mold filled with a molten metallic foundry material with installed foundry cores.

Keywords: foundry core, foundry mold, mathematical model, physical and technical characteristics, core mixture, tensile strength, breakdown, numerical experiment, composition, gas permeability coefficient, outgassing rate, heat capacity, density, thermal conductivity

For citation

Gutko Yu.I., Voytenko V.V. Study on Temperature Dependences for Physical and Technical Characteristics of Foundry Sodium Silicate Sand Cores. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 1, pp. 39-48. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-39-48>

Введение

Стержневые процессы являются неотъемлемой частью литейного производства, поэтому они непрерывно совершенствуются вместе с литейными технологиями и литейным оборудованием. В настоящее время большинство изделий из черных и цветных металлов и сплавов предпочтительнее изготавливать путем литья вместо применения технологии механической обработки металлов и технологии обработки металлов давлением. Несмотря на широкое применение песчано-смоляных литейных стержней, где в качестве связующих веществ используются синтетические смолы, в настоящее время возобновился интерес к песчано-жидкостеклольному стержневому процессу, как наиболее доступному, простому в реализации и безопасному для здоровья человека и окружающей среды. Путем подбора рецептуры стержневой смеси и

технологии изготовления литейных стержней в значительной степени преодолены основные недостатки песчано-жидкостеклольного стержневого процесса: плохая выбиваемость литейного стержня, сравнительно длительное время набора прочности литейным стержнем и малая живучесть стержневой смеси. Это открывает новые перспективы для песчано-жидкостеклольного стержневого процесса при изготовлении отливок из черных и цветных металлов и сплавов. К тому же песчано-жидкостеклольный стержневой процесс допускает использование оборотной смеси без ухудшения качества литейных стержней, что существенно снижает экологическую нагрузку на окружающую среду по сравнению со стержневыми процессами, использующими синтетические смолы в качестве связующих веществ [1, 2].

Обширные предварительные исследования, проведенные авторами, показывают, что полученные

данные и установленные зависимости физико-технических характеристик песчано-жидкостекольных литейных стержней от рецептуры стержневой смеси и технологии изготовления требуют систематизации в рамках общей математической модели, отражающей температурные зависимости физико-технических характеристик литейных стержней при воздействии высоких температур в процессе изготовления металлических отливок. В перспективе математическая модель может быть дополнена с учетом новых рецептов стержневых смесей и усовершенствований песчано-жидкостекольного стержневого процесса. Такая математическая модель может использоваться в численных экспериментах для исследования температурных зависимостей физико-технических характеристик песчаных литейных стержней, изготовленных с помощью других стержневых процессов, использующих органические и неорганические связующие вещества [3].

Существуют компьютерные среды для моделирования физико-технических характеристик материалов, основанные на математических моделях тепловых процессов, которые могут быть использованы для исследования и прогнозирования поведения различных материалов при высоких температурах [4]. Однако в некоторых случаях результаты, полученные с помощью универсальных математических моделей тепловых процессов, недостаточно хорошо согласуются с результатами экспериментов, направленных на выявление закономерностей поведения песчано-жидкостекольных литейных стержней различных составов при воздействии высоких температур в процессе изготовления металлических отливок [5-7].

Таким образом, существует необходимость в разработке математической модели, сочетающей достоинства существующих математических моделей и учитывающей особенности влияния высоких температур на физико-технические характеристики песчано-жидкостекольных литейных стержней, обнаруженные в ходе многочисленных экспериментальных исследований. Поэтому математическая модель должна содержать не только выражения, полученные аналитическим путем, но и уравнения регрессии, полученные по результатам экспериментальных исследований. Таким образом можно получить адекватную математическую модель, позволяющую проводить численное моделирование, результаты которого будут согласовываться с результатами экспериментальных исследований физико-технических характеристик литейных стержней, что позволит делать обоснованный выбор рецептуры и параметров песчано-жидкостекольного стержневого процесса для достижения заданных физико-технических характеристик и необходимой эксплуатационной устойчивости литейных стержней при воздействии высоких температур.

Возможность моделирования воздействия высоких температур на физико-технические характеристики и эксплуатационные качества песчано-жидко-

стекольных литейных стержней будет способствовать повышению интереса к песчано-жидкостекольному стержневому процессу, его дальнейшему совершенствованию и повышению качества отливок, изготавливаемых из черных и цветных металлов и сплавов. Проведение численных экспериментов позволит оптимизировать использование оборотной смеси в сочетании с другими компонентами стержневой смеси для достижения заданных физико-технических характеристик и эксплуатационных качеств песчано-жидкостекольных литейных стержней.

Целью работы является разработка комплексной математической модели, описывающей температурные зависимости физико-технических характеристик песчано-жидкостекольных литейных стержней, путем усовершенствования существующих математических моделей с учетом результатов экспериментальных исследований.

Материалы и методы исследования

Экспериментальные исследования физико-технических характеристик песчано-жидкостекольных литейных стержней, направленные на установление зависимостей, необходимых для построения комплексной математической модели, проводились по традиционному методикам, выполненным в соответствии с ГОСТ 28840-90 «Машины для испытания материалов на растяжение, сжатие и изгиб», ГОСТ 10580-2006 «Оборудование технологическое для литейного производства» и ГОСТ 23409-78 «Пески формовочные, смеси формовочные и стержневые» [8-10].

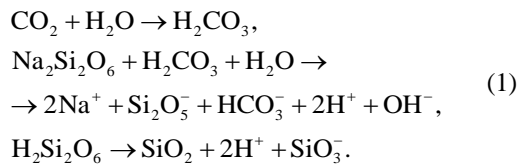
Литейные формы изготавливались с использованием формовочной смеси следующего состава: формовочный песок марки $2K_2O_3$ (ГОСТ 2138-91) – 75 мас.%; глина огнеупорная формовочная каолиновая марки М2 (ГОСТ 3226-93) – 20 мас.%; каменноугольная пыль марки ПЖ (ГОСТ 19242-73) – 5 мас.%. В качестве литейных материалов использовались алюминиевые сплавы марок АК9 и АК12, а также серый чугун марки СЧ20. Толщина стенки металлической отливки составляла 15-25 мм. Металл перегревался в печи на 30-40°C. Температура алюминиевых сплавов при заливке в литейную форму составляла 750-780°C, а температура серого чугуна – 1300-1330°C. Измерение температуры выполнялось с помощью пирометра КМ-ИТ1600 с установленным коэффициентом излучения 0,3. Объем заливаемого в литейную форму металлического расплава составлял $5,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$, площадь соприкосновения расплава с литейной формой составляла $1,7 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$, а площадь соприкосновения расплава с песчано-жидкостекольным литейным стержнем – $6,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$.

В результате воздействия высоких температур на песчано-жидкостекольный литейный стержень происходило ступенчатое термическое разложение его компонентов в следующей последовательности: химическая реакция между продуктами разложения щелочного силиката; химическая реакция между гидра-

тированной кремниевой кислотой и карбонатом натрия; химическая реакция образованного силиката с кристаллическим кварцем: $\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ [11].

Вводимая в состав песчано-жидкостекольной стержневой смеси добавка – измельченная морская ракушка, представляющая собой карбонат кальция, в результате воздействия высоких температур на литейный стержень разлагается согласно химической реакции $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$. В результате вышеуказанных химических преобразований происходит разрушение литейного стержня под действием высоких температур.

Образцы песчано-жидкостекольных литейных стержней изготавливались в полиэтиленовых стержневых ящиках и отверждались углекислым газом. Упрочнение литейного стержня происходило в результате следующей последовательности химических реакций:



Под действием ионов H^+ жидкое натриевое стекло образует гель кремниевой кислоты $n\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$, который склеивает компоненты стержневой смеси [11].

Полученные по результатам экспериментальных исследований регрессионные модели вошли в состав рассматриваемой далее математической модели.

При построении математической модели, описывающей температурные зависимости физико-технических характеристик песчано-жидкостекольных литейных стержней, приняты следующие допущения и упрощения. Рассматривается система «металлический расплав – литейная форма – литейный стержень», которая обменивается теплом с окружающей средой за счет конвекции и теплового излучения с внешней поверхности литейной формы. Начальным источником тепла в системе служит металлический расплав, при остывании которого теплота перераспределяется между литейной формой и литейным стержнем. Доля тепла, переходящая из металлического расплава в литейную форму и литейный стержень, зависит от отношения площадей литейной формы и литейного стержня, контактирующих с расплавом, температур приконтактных слоев и физических свойств материалов (плотности, теплоемкости и теплопроводности). Теплообменом между литейной формой и литейным стержнем пренебрегаем [12, 13].

В качестве основы для построения математической модели, описывающей температурные зависимости физико-технических характеристик песчано-жидкостекольных литейных стержней, использована математическая модель [14]. Параметры математической модели, их обозначения и размерности представлены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры математической модели
Table 1. Mathematical model parameters

Параметр	Обозначение
Характеристический размер литейного стержня	h_s , м
Характеристический размер стенки литейной формы	h_f , м
Характеристический размер внешней поверхности литейной формы	g_f , м
Характеристический размер внутренней поверхности литейной формы	l_f , м
Площадь поверхности литейного стержня	S_s , м ²
Площадь внешней поверхности литейной формы	S_{fs} , м ²
Площадь внутренней поверхности литейной формы	S_{fj} , м ²
Температура литейного стержня в начальный момент времени	T_{s0} , °C
Температура окружающей воздушной среды	T_0 , °C
Степень черноты литейного стержня	a_s
Степень черноты литейной формы	a_f

В следующих расчетах используются аппроксимационные выражения, отражающие зависимости теплофизических величин для литейного стержня, литейной формы и металлического расплава от температуры T , °C, полученные авторами.

Коэффициент теплопроводности литейного стержня, Вт/(м · °C), состоящего из формовочного кварцевого песка марки 2К04А с модулем крупности 315-630 мкм, жидкого натриевого стекла с силикатным модулем 2,31-2,60 и плотностью 1,47-1,52 г/см³, а также измельченной морской ракушки

$$\begin{aligned} K_s(T) &= K_a(a) + 6 \cdot 10^{-4} \cdot T, \\ K_a(a) &= 0,6894 - 0,0248 \cdot a + 5,7029 \cdot a^2, \end{aligned} \quad (2)$$

где a – массовая доля измельченной морской ракушки в стержневой смеси, мас. %.

Плотность литейного стержня, кг/м³,

$$\rho_s(T) = 1920 - 0,042 \cdot T. \quad (3)$$

Теплоемкость литейного стержня, Дж/(кг · °C),

$$\begin{aligned} C_s(T) &= C_a(a) + 25 \cdot 10^{-3} \cdot T, \\ C_a(a) &= 417,53 + 28,46 \cdot a - 0,24 \cdot a^2, \end{aligned} \quad (4)$$

где a – массовая доля измельченной морской ракушки в стержневой смеси, мас. %.

Коэффициент теплопроводности литейной формы, Вт/(м · °C),

$$K_f(T) = 0,17 - 0,15 \cdot 10^{-4} \cdot T. \quad (5)$$

Плотность материала литейной формы, кг/м³,

$$\rho_f(T) = 1633 - 0,034 \cdot T. \quad (6)$$

Теплоемкость материала литейной формы, Дж/(кг · °С),

$$C_f(T) = 843 + 6,35 \cdot 10^{-2} \cdot T. \quad (7)$$

Предел прочности литейного стержня при растяжении, МПа,

$$\sigma_1(T) = b - c \cdot T + d \cdot T^2. \quad (8)$$

В табл. 2 приведены коэффициенты уравнения для расчета предела прочности песчано-жидкостеклового литейного стержня при растяжении.

Предел прочности литейного стержня при сжатии, МПа,

$$\begin{aligned} \sigma_2(T) &= \sigma_a(a) - 1,32 \cdot 10^{-3} \cdot T + 2,4 \cdot 10^{-6} \cdot T^2, \\ \sigma_a(a) &= 2,25 - 0,062 \cdot a. \end{aligned} \quad (9)$$

Предел прочности литейного стержня при изгибе, МПа,

$$\begin{aligned} \sigma_3(T) &= \sigma_a(a) - 1,48 \cdot 10^{-3} \cdot T + 2,73 \cdot 10^{-6} \cdot T^2, \\ \sigma_a(a) &= 1,22 - 0,068 \cdot a. \end{aligned} \quad (10)$$

Коэффициент газопроницаемости литейного стержня, Д (дарси),

$$M(a) = 7,92 + 0,881 \cdot a. \quad (11)$$

Температурная зависимость коэффициента газопроницаемости литейного стержня, Д,

$$M(T) = 7,46 + 2,28 \cdot 10^{-2} \cdot T. \quad (12)$$

Температурная зависимость коэффициента газопроницаемости литейного стержня с оптимальной массовой долей измельченной морской ракушки, равной 15 мас.%, Д,

$$M(T) = 15,57 + 9,12 \cdot 10^{-3} \cdot T. \quad (13)$$

Зависимость газовой выделенности из объема литейного стержня от массовой доли измельченной морской ракушки, м³/м³,

$$V(a) = 8,01 - 0,614 \cdot a + 1,21 \cdot 10^{-2} \cdot a^2. \quad (14)$$

Зависимость газовой выделенности из объема литейного стержня, содержащего 10 мас.% измельченной морской ракушки, от массовой доли оборотной смеси, м³/м³,

$$V(b) = 6,81 - 0,146 \cdot b + 2,87 \cdot 10^{-4} \cdot b^2, \quad (15)$$

где b – массовая доля оборотной смеси в стержневой смеси, мас.%,

Выбиваемость литейного стержня, балл,

$$B(T) = 9,82 - 3,48 \cdot 10^{-3} \cdot T. \quad (16)$$

Применена десятибалльная шкала выбиваемости, введенная авторами, в которой наилучшей выбиваемости соответствует 0 баллов, а наихудшей – 10 баллов.

В следующих расчетах используются аппроксимационные выражения, отражающие зависимости теплофизических величин для воздуха, полученные авторами с использованием табличных значений источников [5-7].

Теплоемкость воздуха, Дж/(кг · °С),

$$C_0(T) = 984 + 0,218 \cdot T - 7,36 \cdot 10^{-6} \cdot T^2. \quad (17)$$

Коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м · °С),

$$K_0(T) = 2,52 \cdot 10^{-2} + 7,42 \cdot 10^{-5} \cdot T - 1,98 \cdot 10^{-8} \cdot T^2. \quad (18)$$

Динамическая вязкость воздуха, Па · с,

$$\eta_0(T) = 1,79 \cdot 10^{-5} + 4,25 \cdot 10^{-8} \cdot T - 1,18 \cdot 10^{-11} \cdot T^2. \quad (19)$$

Кинематическая вязкость воздуха, м²/с,

$$\nu_0(T) = 1,16 \cdot 10^{-5} + 1,05 \cdot 10^{-7} \cdot T + 6,07 \cdot 10^{-11} \cdot T^2. \quad (20)$$

Моделирование тепловых процессов, протекающих в литейной форме при заполнении литейной полости металлическим расплавом, а также связанных с ними физико-технических характеристик песчано-жидкостеклового литейного стержня, выполнено в следующем порядке.

Удельная изобарная теплоемкость литейного стержня, Дж/(м³ · °С),

$$C_{si}(T) = \rho_s(T) \cdot C_s(T). \quad (21)$$

Таблица 2. Коэффициенты уравнения для расчета предела прочности $\sigma_1(T)$

Table 2. Coefficients of the equation used to calculate tensile strength $\sigma_1(T)$

Состав литейного стержня, мас.%			Коэффициенты уравнения		
Формовочный кварцевый песок	Жидкое натриевое стекло	Измельченная морская ракушка	b	c	d
85	15	0	1,90	$3,55 \cdot 10^{-3}$	$2,54 \cdot 10^{-6}$
75	15	10	1,06	$8,54 \cdot 10^{-4}$	$7,53 \cdot 10^{-7}$
70	15	15	$8,95 \cdot 10^{-1}$	$2,02 \cdot 10^{-3}$	$1,69 \cdot 10^{-6}$
60	15	25	$7,84 \cdot 10^{-1}$	$8,21 \cdot 10^{-4}$	$2,52 \cdot 10^{-7}$

Температуропроводность литейного стержня, м²/с,

$$L_s(T) = \frac{K_s(T)}{C_{si}(T)}. \quad (22)$$

Избыточное количество теплоты в системе «металлический расплав – литейная форма – литейный стержень» в момент времени t , Дж,

$$Q(t) = C_r(t) \cdot m_r \cdot (T_r(t) - T_0), \quad (23)$$

где C_r – удельная теплоемкость расплава, Дж/(кг · °С); m_r – масса расплава, кг; $T_r(t)$ – температура расплава, измеряемая в процессе остывания, °С.

Доля теплоты, переходящая из металлического расплава в литейный стержень,

$$k_1 = A + (1 - A) \cdot k_r, \quad A = k_k + (1 - k_k) \cdot k_s, \\ k_k = \frac{1}{1 + \left(\frac{\rho_s \cdot C_s \cdot K_s}{\rho_f \cdot C_f \cdot K_f} \right)^{\frac{1}{2}}}, \\ k_s = \left(\frac{S_s}{S_s + S_f} \right)^m, \\ k_r = \left(\frac{T_f}{T_s + T_f} \right)^n, \quad (24)$$

где показатели степени m и $n = 0,9-1,0$.

Доля теплоты, переходящая из металлического расплава в литейную форму,

$$k_2 = 1 - k_1. \quad (25)$$

Плотность теплового потока из металлического расплава в литейный стержень, Вт/м²,

$$q_s(t) = \frac{k_1(t) \cdot (Q(t - \tau) - Q(t))}{\tau \cdot S_s}, \quad (26)$$

где τ – шаг изменения температуры расплава, с.

Вводим безразмерное относительное время:

$$t_o = \frac{L_s \cdot t}{h_s^2}. \quad (27)$$

Вводим безразмерную относительную температуру:

$$R_1(t) = t_o + \frac{h^2}{2} - \frac{1}{6} + \frac{2}{\pi^2} \cdot \cos(\pi \cdot h) \cdot \exp(-p^2 \cdot t_o), \quad (28)$$

где h – безразмерная координата по толщине литейного стержня; p – первый корень характеристического уравнения.

Число Рейнольдса для внешней поверхности литейной формы

$$Re_f(t) = \frac{\rho_0 \cdot v_0(t) \cdot g_f}{\eta_0}, \quad (29)$$

где $v_0(t)$ – скорость воздушных потоков над поверхностью литейной формы, м/с.

Число Прандтля

$$Pr_f = \frac{\eta_0 \cdot C_0}{K_0}. \quad (30)$$

В следующих расчетах используются корреляционные соотношения между характеристическим размером внешней поверхности литейной формы и скоростью конвекционного воздушного потока.

Коэффициент теплопередачи при внешней конвекции, Вт/(м² · °С), с учетом того, что $Re_f \leq 5 \cdot 10^5$, определяется по формуле

$$\alpha(t) = \frac{2 \cdot K_0}{g_f} \cdot \frac{0,3387 \cdot (Pr_f)^{\frac{1}{3}} \cdot (Re_f(t))^{\frac{1}{2}}}{\left(1 + \left[\frac{0,0468}{Pr_f(T)} \right]^{\frac{2}{3}} \right)^{\frac{1}{4}}}. \quad (31)$$

Внешний конвективный тепловой поток в направлении нормали к поверхности литейной формы, Вт/м²,

$$q_{f2}(t) = \alpha(t) \cdot (T_f(t) - T_0), \quad (32)$$

где $T_f(t)$ – средняя температура литейной формы в момент времени t , °С.

Поток мощности теплового излучения с поверхности литейной формы, Вт/м²,

$$q_{f3}(t) = a_f \cdot \sigma \cdot \left([T_f(t) + 273]^4 - [T_0 + 273]^4 \right), \quad (33)$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана, кг/(с³ · К⁴).

Тепловой поток, идущий на нагрев литейной формы, Вт/м²,

$$q_{f1}(t) = q_f(t) - q_{f2}(t) - q_{f3}(t). \quad (34)$$

Средняя температура литейного стержня в момент времени t , °С,

$$T_s(t) = \frac{R_s(t) \cdot q_s(t) \cdot h_s}{K_s(t)} + T_s(t - \tau). \quad (35)$$

Переход от безразмерного времени t_0 к t , с:

$$t = \frac{t_0 \cdot h_s^2}{L_s} \quad (36)$$

Энергия, рассеиваемая конвекцией с внешней поверхности литейной формы за время τ , Дж,

$$w_{f2}(t) = q_{f2}(t) \cdot S_{f1} \cdot \tau \quad (37)$$

Энергия, идущая на нагрев литейного стержня за время τ , Дж,

$$w_s(t) = q_s(t) \cdot S_s \cdot \tau \quad (38)$$

Энергия, рассеиваемая тепловым излучением с внешней поверхности литейной формы за время τ , Дж,

$$w_{f3}(t) = q_{f3}(t) \cdot S_{f1} \cdot \tau \quad (39)$$

Суммарная энергия, рассеиваемая конвекцией с наружной поверхности литейной формы за время кристаллизации металлического расплава t_k , Дж,

$$w_{f2\Sigma} = S_{f1} \int_0^{t_k} q_{f2}(t) dt \quad (40)$$

Суммарная энергия, идущая на нагрев литейного стержня за время кристаллизации металлического расплава, Дж,

$$w_{s\Sigma} = S_s \int_0^{t_k} q_s(t) dt \quad (41)$$

Суммарная энергия, рассеиваемая тепловым излучением с внешней поверхности литейной формы за время кристаллизации металлического расплава, Дж,

$$w_{f3\Sigma} = S_{f1} \int_0^{t_k} q_{f3}(t) dt \quad (42)$$

Температура литейного стержня в момент времени t , °С, с учетом его объема V_s ,

$$T_s(t) = \frac{R_s(t) \cdot q_s(t) \cdot h_s}{K_s(t)} + T_s(t - \tau) + \frac{q_s(t)}{\rho_s(t) \cdot C_s(t) \cdot V_s} \quad (43)$$

Полученные результаты и их обсуждение

Далее, согласно вышеприведенным формулам, выполняется расчет коэффициента газопроницаемости, газовыделения, выбиваемости, а также пределов прочностей песчано-жидкостекольного литейного стержня при растяжении, сжатии и изгибе в зависимости от температуры в момент времени t . В качестве примера приведены результаты численного эксперимента, полученные с помощью предложенной математической модели.

На **рис. 1** приведены временные зависимости пределов прочностей песчано-жидкостекольных литейных стержней с разными массовыми долями измельченной морской ракушки (0, 10, 15 и 25 мас.%) при растяжении. Графики показывают динамику изменения во времени предела прочности литейного стержня при растяжении, начиная с момента окончания заполнения литейной полости металлическим расплавом, с учетом параметров литейной формы, литейного стержня и металлического расплава. По результатам численного эксперимента можно сделать вывод, достаточной ли прочностью будет обладать литейный стержень в определенный момент времени для предотвращения преждевременного разрушения.

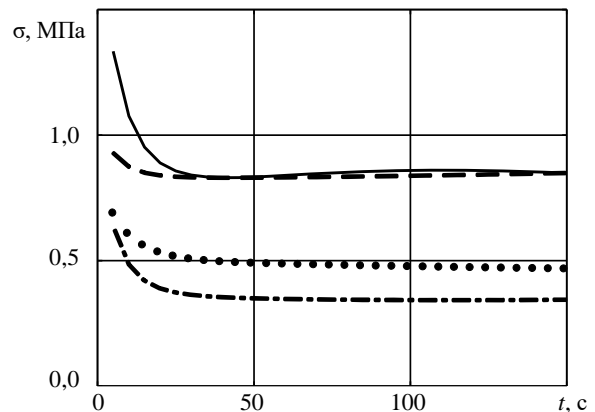


Рис. 1. Временные зависимости пределов прочностей песчано-жидкостекольных литейных стержней с разными массовыми долями измельченной морской ракушки при растяжении:
— 0 мас.%; --- 10 мас.%; - · - - 15 мас.%;
• - 25 мас.%

Fig. 1. Time dependences for tensile strength of foundry sodium silicate sand cores with different mass fractions of crushed seashells under tension:
— is 0 wt %; --- is 10 wt %; - · - is 15 wt %;
• is 25 wt %

По временным зависимостям коэффициентов газопроницаемости песчано-жидкостекольных литейных стержней (**рис. 2**) можно судить о газопроницаемости литейных стержней различных составов и сделать вывод о необходимости наличия каналов отвода углекислого газа и водяного пара, образующихся в объеме литейного стержня.

По временным зависимостям газовыделений из объемов песчано-жидкостекольных литейных стержней (**рис. 3**) можно судить о динамике выделения углекислого газа и водяного пара и по этим значениям подобрать размеры каналов газоотведения для литейных стержней различных составов.

Аналогичным образом можно прогнозировать выбиваемость песчано-жидкостекольных литейных стержней различных составов.

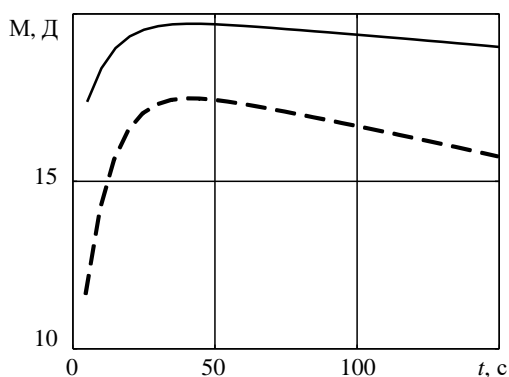


Рис. 2. Временные зависимости коэффициентов газопроницаемости песчано-жидкостекольных литейных стержней с разными массовыми долями измельченной морской ракушки: --- 10 мас.%; — — — 0 мас.%

Fig. 2. Time dependences for gas permeability coefficients of foundry sodium silicate sand cores with different mass fractions of crushed seashells: — is 10 wt %; --- is 0 wt %

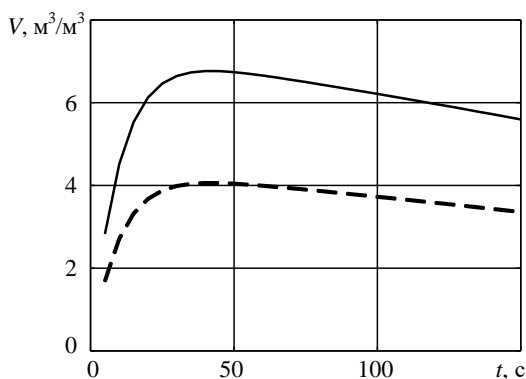


Рис. 3. Временные зависимости газовыделений из объемов песчано-жидкостекольных литейных стержней с разными массовыми долями измельченной морской ракушки: --- 0 мас.%; — — — 15 мас.%

Fig. 3. Time dependences of outgassing rates for volumes of foundry sodium silicate sand cores with different mass fractions of crushed seashells: — is 0 wt %; --- is 15 wt %

Заключение

По результатам экспериментальных и теоретических исследований разработана математическая модель, отражающая температурные зависимости физико-технических характеристик песчано-жидкостекольных литейных стержней перспективных составов с учетом параметров литейной формы, литейного стержня, металлического расплава и окружающей воздушной среды. Предложенная математическая модель систематизирует ранее полученные экспериментальные зависимости некоторых физико-технических характеристик литейных стержней и, таким образом, позволяет проводить численные эксперименты для различных комбинаций входных парамет-

ров, существенно упрощая дальнейшие исследования, направленные на поиск наилучшего сочетания параметров песчано-жидкостекольного стержневого процесса для достижения требуемых физико-технических характеристик литейных стержней при воздействии высоких температур в процессе изготовления металлических отливок.

Результаты численного эксперимента, полученные с использованием предложенной математической модели, демонстрируют возможность прогнозирования физико-технических характеристик литейных стержней различных составов с учетом параметров литейной формы, литейного стержня, металлического расплава и окружающей воздушной среды. Полученные данные позволяют делать обоснованный выбор рецептуры стержневой смеси и параметров технологического процесса, а также могут служить основой для дальнейших исследований, направленных на усовершенствование литейных технологий и литейного оборудования. Вошедшие в состав математической модели регрессионные модели, полученные экспериментально, сами по себе представляют практическую ценность.

Список источников

1. Рольф Р. Литейные технологии: учебник. Нур-Султан: Фолиант, 2019. 408 с.
2. Holtzer M., Kmita A. Mold and Core Sands in Metalcasting: Chemistry and Ecology Sustainable Development. New York City, Dordrecht, Heidelberg, London: Springer, 2020. 378 с.
3. Groover M.P. Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems. 7th Ed. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2020. 816 с.
4. Heat Transfer Module User's Guide. Burlington, Massachusetts, USA: COMSOL, 2019. 788 p. URL: <https://doc.comsol.com/5.5/doc/com.comsol.help.heat/HeatTransferModuleUsersGuide.pdf> (дата обращения: 27.01.2024).
5. Гутько Ю.И., Войтенко В.В. Исследование прочности и выбиваемости песчано-жидкостекольных литейных стержней, содержащих стальной порошок // Теория и технология металлургического производства. 2022. №2 (41). С. 12-17. URL: <http://ttmp.magtu.ru/doc/2022/2/12-17.pdf> (дата обращения: 27.01.2024).
6. Гутько Ю.И., Войтенко В.В. Исследования выбиваемости и газовыделения песчаных литейных стержней на органическом связующем веществе // Настоящее и будущее современных научных направлений: сб. матер. Междунар. науч.-практ. конф. (13 июня 2022 г.). Кемерово: Западно-Сибирский научный центр, 2022. С. 70-73. URL: https://www.sibscience-new.ru/images/doc_temp/2022/Sbornik_13_06_22.pdf (дата обращения: 27.01.2024).
7. Гутько Ю.И., Войтенко В.В. Исследование выбиваемости жидкостекольных литейных стержней // Настоящее и будущее современных научных направлений: сб. матер. Междунар. науч.-практ.

- конф. (18 мая 2021 г.). Кемерово: Западно-Сибирский научный центр, 2021. С. 14-17. URL: https://www.sibscience-new.ru/images/doc_temp/18_05.pdf (дата обращения: 27.01.2024).
8. ГОСТ 28840-90. Машины для испытания материалов на растяжение, сжатие и изгиб. Общие технические требования = Machines for Tension, Compression, and Bending Testing of Materials. General Technical Requirements: межгосударственный стандарт: издание официальное: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 29 декабря 1990 № 3530: введен впервые: дата введения: 01.01.1993. М.: Изд-во стандартов, 2004. 8 с. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294852/4294852156.pdf> (дата обращения: 27.01.2024).
 9. ГОСТ 10580-2006. Оборудование технологическое для литейного производства. Общие технические условия = Technological Equipment for Foundry. General Technical Conditions: межгосударственный стандарт: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 4 сентября 2007 г. №233: введен впервые: дата введения: 01.01.2008. М.: Стандартиформ, 2009. 23 с. URL: <https://meganorm.ru/Data/56/5694.pdf> (дата обращения: 27.01.2024).
 10. ГОСТ 23409-78. Пески формовочные, смеси формовочные и стержневые = Moulding Sands, Moulding and Core Sand Mixtures: межгосударственный стандарт: издание официальное: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 27 декабря 1978 г. №3489: введен впервые: дата введения: 01.01.1980 М.: Изд-во стандартов, 1995. 3 с. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294830/4294830675.pdf> (дата обращения: 27.01.2024).
 11. Тютина Е.А. Разработка технологии получения легковыбываемых жидкостекольных стержневых смесей: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.04. РГБ ОД, 61:06-5/1944. Комсомольск-на-Амуре, 2006. 173 с.
 12. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. 2-е изд., доп. и перераб. М.: Наука, 1972. 720 с.
 13. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов: Справочное руководство. М.: Физматгиз, 1959. 356 с.
 14. Codina R. Comparison of Some Finite Element Methods for Solving the Diffusion-Convection-Reaction Equation // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. Amsterdam: Elsevier. 1998, no. 156, pp. 185-210. DOI: 10.1016/S0045-7825(97)00206-5.
 2. Holtzer M., Kmita A. Mold and core sands in metal-casting: Chemistry and ecology: Sustainable development. New York City, Dordrecht, Heidelberg, London: Springer, 2020, 378 p.
 3. Groover M.P. Fundamentals of modern manufacturing: Materials, processes, and systems. 7th ed. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2020, 816 p.
 4. Heat Transfer Module User's Guide. Burlington, Massachusetts, USA: COMSOL, 2019, 788 p. Available at: <https://doc.comsol.com/5.5/doc/com.comsol.help.heat/HeatTransferModuleUsersGuide.pdf> (Accessed on January 27, 2024).
 5. Gutko Yu.I., Voytenko V.V. Research of strength and breakdown of foundry liquid-glass cores containing steel powder. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva* [Theory and Technology of Metallurgical Production]. 2022;(2(41)):12-17. (In Russ.) Available at: <http://ttmp.magtu.ru/doc/2022/2/12-17.pdf> (Accessed on January 27, 2024).
 6. Gutko Yu.I., Voytenko V.V. Studies on breakdown and outgassing rates of foundry sand cores using an organic binder. *Nastoyashchee i budushchee sovremennykh nauchnykh napravleniy: Sbornik materialov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Present and Future of Contemporary Scientific Fields: Collection of papers of the International Scientific and Practical Conference]. Kemerovo: West Siberian Scientific Center, 2022, pp. 70-73. Available at: https://www.sibscience-new.ru/images/doc_temp/2022/Sbornik_13_06_22.pdf (Accessed on January 27, 2024).
 7. Gutko Yu.I., Voytenko V.V. Research of breakdown of foundry liquid-glass cores. *Nastoyashchee i budushchee sovremennykh nauchnykh napravleniy: Sbornik materialov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Present and Future of Contemporary Scientific Fields: Collection of papers of the International Scientific and Practical Conference]. Kemerovo: West Siberian Scientific Center, 2021, pp. 14-17. Available at: https://www.sibscience-new.ru/images/doc_temp/18_05.pdf (Accessed on January 27, 2024).
 8. State Standard GOST 28840-90. *Mashiny dlya ispytaniya materialov na rastyazhenie, szhatie i izgib. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya* [Machines for tension, compression, and bending testing of materials. General technical requirements]. Moscow: Izdatelstvo standartov, 2004, 8 p. (In Russ.) Available at: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294852/4294852156.pdf> (Accessed on January 27, 2024).
 9. State Standard GOST 10580-2006. *Oborudovanie tekhnologicheskoe dlya liteinogo proizvodstva. Obshchie tekhnicheskie usloviya* [Technological equipment for foundry. General technical conditions]. Moscow: Izdatelstvo standartov, 2009, 23 p. (In Russ.) Available at: <https://meganorm.ru/Data/56/5694.pdf> (Accessed on January 27, 2024).
 10. State Standard GOST 23409-78. *Peski formovochnye, smesi formovochnye i sterzhnevyye* [Moulding sands, moulding and core sand mixtures]. Moscow: Iz-

References

1. Rolf R. *Liteynye tekhnologii: Uchebnik* [Foundry technologies: textbook]. Nur-Sultan: Foliant, 2019, 408 p. (In Russ.)

- datelstvo standartov, 1995, 3 p. (In Russ.) Available at: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294830/4294830675.pdf> (Accessed on January 27, 2024).
11. Tyutina E.A. *Razrabotka tekhnologii polucheniya legkovybivaemykh zhidkostekolnykh sterzhnevnykh smesey: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Development of the technology for producing of easily knocked out sodium silicate core mixtures. PhD thesis]. Komsomolsk-on-Amur, 2006, 173 p. (In Russ.)
 12. Vargaftik N.B. *Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam gazov i zhidkostey* [Handbook of thermo-physical properties for gases and liquids]. Moscow: Nauka, 1972, 720 p. (In Russ.)
 13. Chirkin V.S. *Teplofizicheskie svoystva materialov: Spravochnoe rukovodstvo* [Thermophysical properties of materials: reference guide]. Moscow: Fizmatgiz, 1959, 356 p. (In Russ.)
 14. Codina R. Comparison of some finite element methods for solving the diffusion-convection-reaction equation. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. Amsterdam: Elsevier, 1998;156:185-210. DOI: 10.1016/S0045-7825(97)00206-5.

Поступила 07.11.2023; принята к публикации 27.01.2024; опубликована 28.03.2024
Submitted 07/11/2023; revised 27/01/2024; published 28/03/2024

Гутько Юрий Иванович – доктор технических наук, профессор, первый проректор, Луганский государственный университет им. В. Даля, Луганск, Луганская Народная Республика, Россия.
Email: lguni.lit@yandex.ru.

Войтенко Валерий Владимирович – аспирант, кафедра цифровых технологий и машин в литейном производстве, Луганский государственный университет им. В. Даля, Луганск, Луганская Народная Республика, Россия.
Email: valery.voytenko@outlook.com. ORCID 0009-0004-0267-5068

Yury I. Gutko – DrSc (Eng.), Professor, First Vice-Rector, Vladimir Dal Lugansk State University, Lugansk, Lugansk People’s Republic, Russia.
Email: lguni.lit@yandex.ru.

Valery V. Voytenko – postgraduate student, Department of Digital Technologies and Machines in Foundry, Vladimir Dal Lugansk State University, Lugansk, Lugansk People’s Republic, Russia.
Email: valery.voytenko@outlook.com. ORCID 0009-0004-0267-5068

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

METAL FORMING

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

УДК 621.778

DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-1-49-60



ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПРОВОЛОКИ ТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ ИЗ НОВОГО СПЛАВА ПАЛЛАДИЯ

Сидельников С.Б., Лопатина Е.С., Лопатин В.А., Беляев С.В., Арнаутов А.Д., Дитковская Ю.Д.

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

Аннотация. Разработка новых технологий производства длинномерных деформированных полуфабрикатов из сплавов драгоценных металлов, в частности сплавов на основе палладия, является актуальной задачей металлургического производства. Особенно это важно для получения изделий технического назначения, предназначенных для высокоточных электрических приборов и устройств, которые в настоящее время производятся за рубежом. В представленной работе решается задача по разработке технологии для получения проволоки из нового сплава на основе палладия с заданным комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств. В первую очередь это достигается тем, что на основе патентного анализа имеющихся технических решений предложен и запатентован сплав палладия, предназначенный для термомеханической обработки и получения проволочных контактов для передачи видеосигналов. Для разработки режимов деформации и определения силовых параметров в программном комплексе Deform-3D проведено моделирование с использованием аппроксимационной формулы для расчета временного сопротивления в зависимости от суммарной степени обжатия, которая была необходима для создания компьютерных моделей процессов сортовой прокатки и волочения. С их помощью были изучены особенности формоизменения металла, напряженно-деформированное состояние, определены силовые параметры этих процессов и проведена их оценка с позиций ограничения по допустимой нагрузке оборудования, а также возможности разрушения заготовок при прокатке с использованием критерия Кокрофта-Латама. Для проверки адекватности работы компьютерных моделей были проведены экспериментальные исследования процессов сортовой прокатки и волочения, результаты которых дали возможность получить опытные образцы проволоки и изучить ее физико-механические свойства и структуру металла. Проведенные экспериментальные исследования процесса получения проволоки технического назначения из нового сплава палладия показали, что предложенные режимы обжатий позволяют получать проволоку диаметром до 0,5 мм с требуемым уровнем механических и электрических характеристик. Результаты проведенных исследований могут послужить базой для создания промышленной технологии с использованием оборудования, применяемого на заводах по обработке драгоценных металлов и их сплавов.

Ключевые слова: палладий, сплавы, проволока, сортовая прокатка, волочение, энергосиловые параметры, отжиг, физико-механические свойства

Работа выполнена в рамках государственного задания на науку ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», номер проекта FSRZ-2020-0013.

© Сидельников С.Б., Лопатина Е.С., Лопатин В.А., Беляев С.В., Арнаутов А.Д., Дитковская Ю.Д., 2024

Для цитирования

Исследование технологии получения проволоки технического назначения из нового сплава палладия / Сидельников С.Б., Лопатина Е.С., Лопатин В.А., Беляев С.В., Арнаутов А.Д., Дитковская Ю.Д. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №1. С. 49-60. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-49-60>



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

RESEARCH ON THE PRODUCTION TECHNOLOGY FOR TECHNICAL WIRE FROM A NEW PALLADIUM ALLOY

Sidelnikov S.B., Lopatina E.S., Lopatin V.A., Belyaev S.V., Arnautov A.D., Ditkovskaya Yu.D.

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Abstract. The development of new technologies for the production of long-length deformed semi-finished products from precious metal alloys and, in particular, palladium-based alloys, is a currently relevant task of metallurgical production. This is especially important for manufacturing technical products designed for high-precision electrical appliances and devices that are currently manufactured abroad. The presented research solves the task of developing a technology for producing wire from a new palladium-based alloy with a given set of physical and mechanical, and operational properties. First of all, this is achieved, as based on a patent analysis of available technical solutions, the authors proposed and patented a palladium alloy designed for thermal deformation treatment and producing wire contacts for transmitting video signals. To develop reduction modes and determine force parameters, the DEFORM-3D software package was applied for simulation by an approximation formula for calculating ultimate tensile strength depending on the total degree of reduction, which was necessary to create computer models of the long product rolling and drawing processes. The models were used to study the features of metal shaping, and the stress and strain state, determine the power parameters of these processes and evaluate them from the standpoint of limiting the permissible load of equipment, as well as the possibility of workpiece fracture during rolling, using the Cockcroft-Latham criterion. To validate the computer models for adequacy, the authors carried out experimental studies on the long product rolling and drawing processes, whose results provided for a possibility of producing experimental samples of wire and study the physical and mechanical properties and the metal structure. The conducted experimental studies of the process of producing technical wire from a new palladium alloy have shown that the proposed reduction modes can be used to produce wire with a diameter of up to 0.5 mm and the required level of mechanical and electrical characteristics. The results of the conducted research can serve as a basis for developing an industrial technology using equipment available at plants for treatment of precious metals and their alloys.

Keywords: palladium, alloys, wire, long product rolling, drawing, power parameters, annealing, physical and mechanical properties

The research was carried out as part of the state task for science of Siberian Federal University, Project No. FSRZ-2020-0013.

For citation

Sidelnikov S.B., Lopatina E.S., Lopatin V.A., Belyaev S.V., Arnautov A.D., Ditkovskaya Yu.D. Research on the Production Technology for Technical Wire from a New Palladium Alloy. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 1, pp. 49-60. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-49-60>

Введение

В промышленности широко используются палладий и его сплавы, обладающие хорошими эксплуатационными свойствами и оптическими характеристиками, при этом они имеют привлекательный вид и сочетаются с драгоценными, полудрагоценными камнями и эмальями [1, 2]. Сплавы палладия имеют высокие механические свойства, пригодны для всех видов обработки давлением и резанием и обладают интенсивным белым цветом [3]. Для получения сплавов на основе палладия с повышенными механическими свойствами в него в качестве легирующих элементов обычно добавляют золото, серебро, никель, медь и другие элементы [4]. Изделия из палладия за последнее время стали пользоваться большей популярностью, при этом цены на палладий существенно возросли и превысили цены на платину [5].

Сплавы драгоценных металлов распространены для применения в приборах электронных устройств,

для изготовления элементов высокочастотных электрических приборов и устройств, в частности проволочных контактов для плат передачи видеосигналов, где желательно низкое контактное сопротивление. С этой целью используются составы сплавов, содержащих палладий, золото, серебро и платину, а также медь и цинк. Для них требуются высокая проводимость в данном диапазоне частот, определенный уровень пластических свойств (возможность гибки контакта под определенную форму) и высокая износостойкость.

Однако существует и ряд особенностей, ограничивающих область их применения, в том числе высокая стоимость, способность к поглощению водорода при литье слитков, нормы безопасности для здоровья человека и экологии. Так, например, изделия из сплавов, содержащих более 0,05% никеля, директива Европейского Сообщества 76/769/ЕЕС [1] запрещает производить и продавать.

Анализ научно-технической литературы показал, что сведения об обработке давлением палладиевых

сплавов немногочисленны, а имеющиеся в основном посвящены получению полуфабрикатов для ювелирного производства [6-8].

Поэтому для производства изделий различного назначения из сплавов на основе палладия необходимо выполнение следующих требований:

- сплавы, используемые для производства, должны быть экологически безвредными и гипоаллергенными, что достигается отсутствием в них никеля, кобальта и других элементов;

- наличие легирующих элементов в сплаве и их концентрации должны обеспечивать соответствующую цветовую гамму изделий и сравнительно низкую себестоимость;

- уровень физико-механических и электрических свойств этих сплавов должен обеспечивать применение больших степеней холодной деформации и для получения хороших эксплуатационных свойств изделий;

- должна быть обеспечена технологичность обработки на применяемом оборудовании и рациональность режимов деформации металла с целью снижения брака и увеличения производительности производства изделий из этих сплавов.

Проведенный технико-экономический анализ производства длинномерных деформированных полуфабрикатов из сплавов драгоценных металлов позволил сделать следующие выводы:

- отечественная продукция из сплавов драгоценных металлов обладает низкой конкурентоспособностью, в том числе из-за несоответствия качества изделий требованиям мирового рынка из-за отсутствия научных разработок по созданию новых сплавов и технологий их термомеханической обработки;

- произошла реструктуризация рынка и возрос спрос на изделия из этих сплавов;

- основными требованиями при создании новых сплавов является повышение технологических и физико-механических свойств литых и деформированных полуфабрикатов из них за счет модифицирования, снижение стоимости изделий и обеспечение соответствия европейским нормам безопасности.

Целью исследований, таким образом, является разработка комплекса научно-технических решений для создания технологии получения проволоки из сплавов палладия для плат передачи видеосигналов.

Материалы, оборудование и методы исследования

Исследованиям подвергались деформированные полуфабрикаты из нового сплава палладия [9], предна-

значенного для изготовления проволочных контактов.

На основе результатов проведенного патентного поиска [9, 10] был предложен и запатентован сплав палладия [11], химический состав которого представлен в **табл. 1**.

В этом сплаве палладий является основным элементом и обеспечивает в заданных пределах получение требуемых физико-механических свойств изделий из него. Серебро при сплавлении с палладием образует систему с непрерывной взаимной растворимостью компонентов и снижает электрическое сопротивление. Медь в качестве легирующего компонента выбрана в связи с образованием с палладием непрерывной системы твердых и жидких растворов. Ее содержание является оптимальным для замещения в сплаве палладия и обеспечивает повышенные прочностные свойства, твердость и износостойкость. Золото повышает пластичность и антикоррозионные свойства, а также уменьшает склонность к газопоглощению при литье. Кроме того, наличие в сплаве серебра, золота и меди в указанных количествах обеспечивает снижение температуры литья на 50-100°C. Платина при сплавлении с палладием также образует систему с непрерывной взаимной растворимостью компонентов и придает сплаву блестящий белый цвет. Добавление цинка снижает температуру плавления сплава и обеспечивает хорошую пластичность. Родий, наряду с модифицирующим действием для измельчения зеренной структуры литой заготовки, является упрочняющей добавкой, повышающей антикоррозионные свойства.

В качестве оборудования использовали сортовые прокатные и волочильные станы фирмы «Марио ди Майо». В **табл. 2** приведены данные для основного прокатного оборудования (**рис. 1, а**), применяемого для исследований. Для многократного волочения проволоки применяли волочильную машину типа 10 NFS TRONIC (**рис. 1, б**), техническая характеристика которой приведена в **табл. 3**.

Исследование структуры полуфабрикатов из нового сплава на основе палладия проводили с использованием светового микроскопа Observer.A1m, Carl Zeiss при увеличении 500 крат. Твердость измеряли с помощью цифрового микротвердомера DM8. Микрорентгеноспектральный анализ образцов проводился с помощью растрового электронного микроскопа EVO 50 с энергодисперсионным анализатором Inca ENERGY 350. Для определения механических свойств литых, кованных и прокатанных образцов использовали универсальную машину LFM 400 kN, имеющую технические характеристики, приведенные в **табл. 4**.

Таблица 1. Химический состав исследуемого сплава палладия

Table 1. Chemical composition of the palladium alloy under study

Содержание компонентов, мас. %						
Pd	Pt	Au	Cu	Zn	Rh	Ag
33,8-54,0	5,0-8,7	5,0-10,5	15-17	1,0-1,8	0,001-0,01	20,0-28,4

Таблица 2. Параметры прокатных станов, применяемых для исследований
 Table 2. Parameters of rolling mills used for research

Наименование параметра	Величина параметра	
	AF 200+180R	LG 200
Длина бочки валков, мм	200+180	200
Диаметр валков, мм	130	110
Скорость прокатки, м/мин	12,5-26	25
Допустимая сила прокатки, кН	60	500
Максимальный момент прокатки, кН·м	13,6	10,3
Максимальная мощность электродвигателя, кВт	7,5	7,5



а



б

Рис. 1. Общий вид сортопрокатного стана AF 200+180R (а) и волочильного стана 10 NFS TRONIC (б)
 Fig. 1. General view of rolling mill AF 200+180R (a) and drawing mill 10 NFS TRONIC (б)

Таблица 3. Параметры волочильного стана, применяемого для исследований
 Table 3. Parameters of the drawing mill used for research

Наименование параметра	Величина параметра
Число проходов	10
Диаметр проволоки, мм	0,12-2
Скорость волочения, м/мин	0-300
Максимальная мощность электродвигателя, кВт	8

Таблица 4. Характеристики универсальной разрывной машины LFM 400 kN
 Table 4. Characteristics of universal testing machine LFM 400 kN

Характеристика	Значение
Максимальное статическое усилие, кН	400
Максимальная скорость, мм/мин	500
Ход траверсы, мм	1000
Максимальное расстояние между захватами, мм	800

Методика экспериментальных исследований базируется на результатах компьютерного моделирования изучаемых процессов деформации металла, а также результатах опытных работ и включала следующие этапы:

- анализ действующих режимов деформации металла для известных сплавов на основе палладия при изготовлении прутков и проволоки;

- экспериментальная апробация предложенных технологий в лабораторных условиях;

- расчет технологических режимов деформации металла с помощью программы «PROVOL» и базы данных «Металлы и оборудование» [1], разработка новых рациональных режимов обжатий и расчет энергосиловых параметров процессов прокатки и волочения с проверкой ограничений;

– определение физико-механических характеристик полуфабрикатов из нового сплава, анализ структуры и свойств полученных длинномерных полуфабрикатов и установление закономерностей их изменения в зависимости от режимов деформации металла.

Для изготовления проволочных контактов (рис. 2, а) из исследуемого сплава провели анализ технологии получения проволоки, применяемой в настоящее время в промышленных условиях, для сплавов на основе палладия, который показал, что в качестве заготовки используется кованный отожженный пруток размерами 15×15 мм (размер стороны $x_i = 15$ мм). Далее ведут прокатку прутков на размер $x_i = 10,5$ мм за 8 проходов на сортовом прокатном стане AF 200+180R с диаметром рабочих валков 130 мм и допустимой силой прокатки 620 кН, а затем получают прутки размерами $x_i = 1,05$ мм за 37 проходов на стане LG 200 с диаметром валков 110 мм и допустимой силой прокатки 500 кН. Окончательно проволоку диаметром в диапазоне 0,50-0,70 мм производят на многократном волоочильном стане со скольжением с допустимой силой волочения 5 кН за 10 переходов.

Выявлено, что при действующей схеме обжатия по проходам распределены неравномерно (рис. 2, б), что приводит к большой вероятности обрыва в 4, 5 и 6-м проходах при прокатке вследствие быстрого упрочнения металла и увеличению силовой загрузки оборудования.

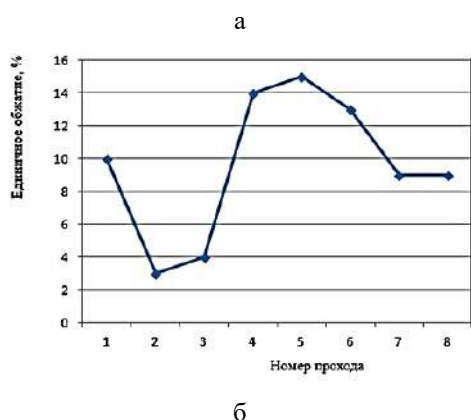


Рис. 2. Вид проволочного контакта из сплавов палладия (а) и изменение единичных обжатий $\varepsilon_{сд}$ по проходам для действующего режима прокатки прутков размером $x_i = 10,5$ мм из заготовки размером $x_i = 15$ мм (б)

Fig. 2. Wire contact made of palladium alloys (а) and the change in single reductions $\varepsilon_{сд}$ by passes for the current rolling mode of bars of size $x_i = 10.5$ mm from a blank of size $x_i = 15$ mm (б)

При прокатке прутков из драгоценных металлов и их сплавов на промышленных сортовых станах традиционно используется калибровка ромб-квадрат со срезанными угловыми элементами (рис. 3, 4). Данная схема калибров позволяет добиться большей точности геометрии и размеров получаемого прутка, обеспечивает равномерность деформации в процессе прокатки по проходам, а также является более близкой к кругу – поперечному сечению получаемой затем проволоки. Применение данной системы калибров увеличивает прочность и стойкость инструмента, поскольку уменьшается разница между рабочими диаметрами валков.

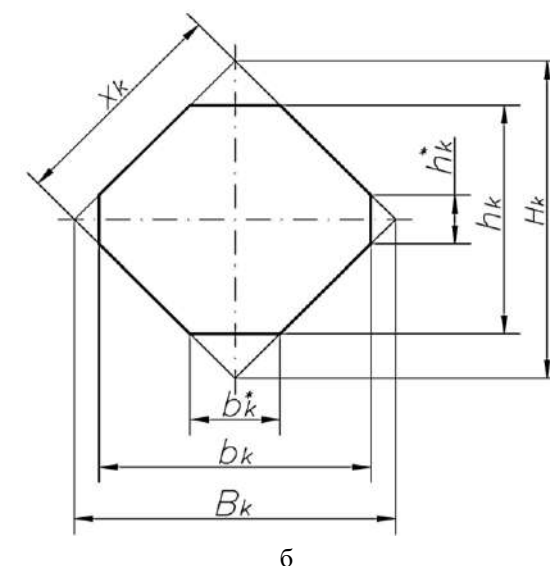
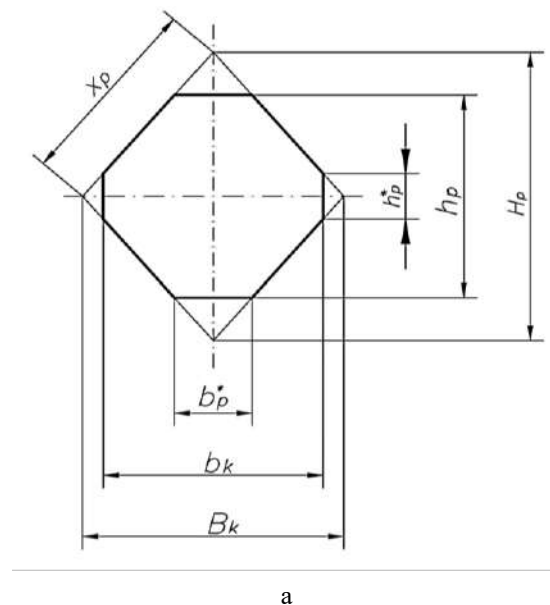


Рис. 3. Калибры, применяемые для производства сортового проката из драгоценных металлов и их сплавов: а – ромбический; б – квадратный
Fig. 3. Passes used for manufacturing long products made of precious metals and their alloys: а is a diamond pass; б is a square pass

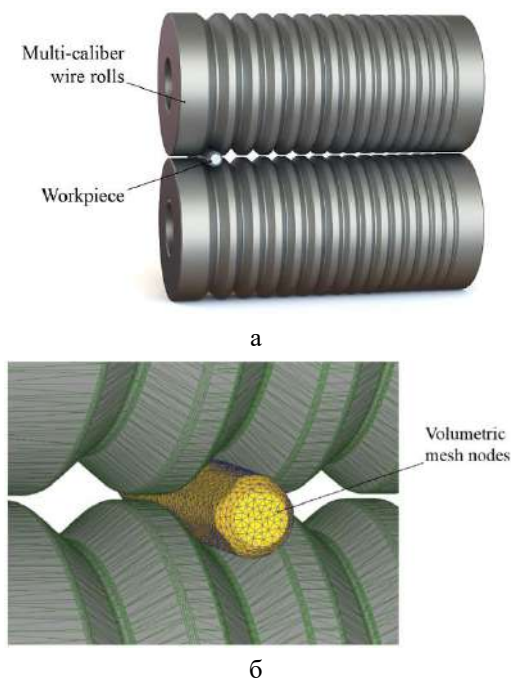


Рис. 4. Общий вид модели сортовой прокатки прутков: а – модель валков в SolidWorks; б – модель процесса прокатки заготовки с конечно-элементной сеткой в Deform-3D
 Fig. 4. General view of the long bar rolling model: a is a model of rolls in SolidWorks; б is a model of the billet rolling process with a finite element grid in Deform-3D

Полученные результаты и их обсуждение

На основании проведенного анализа промышленной технологии предложено перераспределить единичные обжатия $\epsilon_{ед}$ на первом этапе при прокатке на сортовом стане AF 200+180R с диаметром рабочих валков 130 мм и допустимой силой прокатки 620 кН и за 8 проходов получать пруток размерами $x_i = 9$ мм (табл. 5). Суммарное обжатие ϵ_{Σ} при этом за 8 проходов не превышает 64%, что дает возможность прогнозировать прокатку без промежуточного отжига и разрушения металла.

Компьютерное моделирование режимов сортовой прокатки прутка из исследуемого сплава палладия проводили в программе Deform-3D, которая позволила оптимизировать маршрут обработки заготовки путем анализа распределения напряжений и прогнозирования вероятности ее разрушения. Модель включала спроектированные в среде SolidWorks заготовку, рабочий инструмент (см. рис. 4) и задаваемые для них в препроцессоре Deform-3D граничные условия и параметры модели (табл. 6) в соответствии с особенностями используемой технологии.

Для моделирования и расчета силы прокатки $P_{п}$ использовали полученную экспериментальным путем формулу для определения временного сопротивления в зависимости от суммарной степени обжатия, которая имеет вид

$$\sigma_b = 0,1302 \cdot \epsilon_{\Sigma}^2 - 7,7913 \cdot \epsilon_{\Sigma} + 260.$$

Таблица 5. Предложенный режим первого этапа прокатки прутков из сплавов палладия
 Table 5. The proposed mode of the first stage of rolling bars made of palladium alloys

Номер прохода i	Размер стороны x_i , мм	Единичная вытяжка $\lambda_{ед}$	Единичное обжатие $\epsilon_{ед}$, %	Суммарное обжатие ϵ_{Σ} , %	Сила прокатки $P_{п}$, кН
–	15,0	–	–	–	–
1	14,0	1,15	12,9	12,9	22,3
2	13,1	1,14	11,9	23,7	16,2
3	12,4	1,12	10,4	31,6	12,9
4	11,6	1,14	12,1	40,2	14,3
5	11,0	1,11	10,1	46,2	13,1
6	10,5	1,10	8,9	51,0	12,9
7	9,7	1,17	14,6	58,2	17,6
8	9,0	1,16	13,9	64,0	18,2

Таблица 6. Параметры модели для первого этапа сортовой прокатки прутков и волочения
 Table 6. Model parameters for the first stage of long bar rolling and drawing

Параметр	Значение	
	Прокатка	Волочение
Разрешение сетки	1/5 ширины сечения заготовки	
Разрешение хода решателя	1/3 минимального элемента сетки	
Материал инструмента	Абсолютно жесткий	
Материал заготовки	Вязкопластичный	
Коэффициент Пуассона	0,3897	
Температура, °C	20	
Скорость, м/мин	9,7	20
Угол волоки, град	–	7
Коэффициент трения заготовки по инструменту	0,25	0,08
Количество элементов	32000	10000

На рис. 5 представлено распределение напряжений (рис. 5, а) и критерия разрушения Кокрофта-Латама (рис. 5, б), которое позволяет заключить, что металл в конце прокатки обладает достаточным запасом пластичности при его обработке с принятой степенью деформации без использования промежуточных отжигов, при этом значение критерия разрушения близко, но не достигает значения, равного 1. Расчеты показали также

(см. табл. 5), что сила прокатки не превышает допустимой для действующего оборудования.

На втором этапе прокатки использовали режим обжатий, представленный в табл. 7. Расчеты силы прокатки для предлагаемых режимов обжатий также показали, что загрузка оборудования удовлетворяет допустимым значениям этой величины для применяемых сортопрокатных станков.

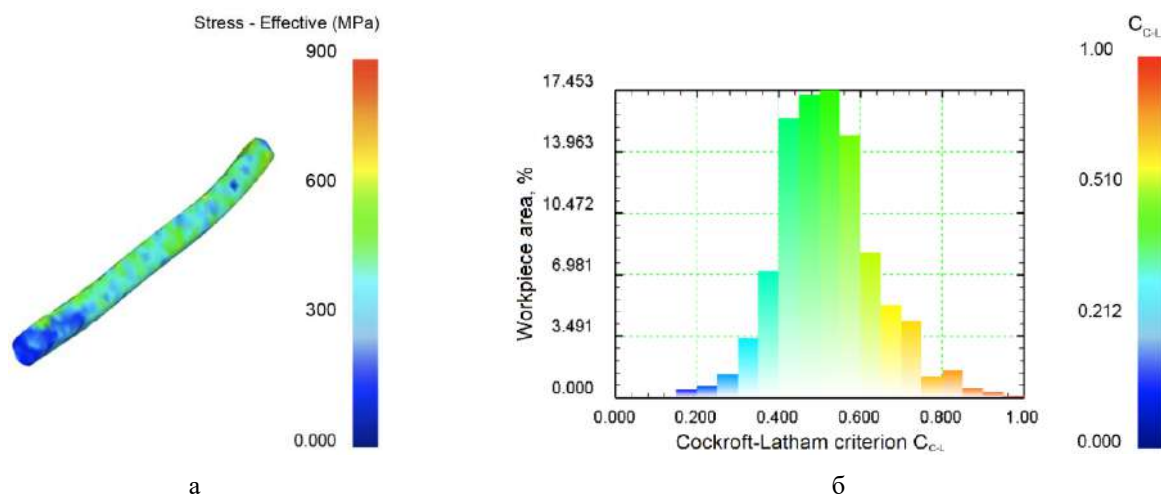


Рис. 5. Визуализация распределения напряжений (а) и распределения критерия разрушения Кокрофта-Латама по поверхности полуфабриката (б)

Fig. 5. Visualization of the stress distribution (a) and the distribution of the Cockcroft-Latham fracture criterion on the surface of the semi-finished product (б)

Таблица 7. Режим обжатий для второго этапа прокатки прутков из исследуемого сплава

Table 7. Reduction mode for the second stage of rolling bars from the alloy under study

Номер прохода i	x_i , мм	$\lambda_{ед}$	$\epsilon_{ед}$, %	ϵ_{Σ} , %	$P_{п}$, кН
1	7,9	1,26	20,5	20,5	8,4
2	7,2	1,20	16,94	34,0	8,3
3	6,4	1,26	20,49	47,5	9,8
4	5,9	1,18	14,97	55,3	9,0
5	5,3	1,25	20,17	64,3	11,8
6	4,6	1,32	24,37	72,7	13,8
7	4,0	1,33	25,14	79,8	13,9
8*	3,4	1,39	27,90	85,4	13,5
9	2,9	1,34	25,30	25,3	2,8
10	2,5	1,38	27,32	45,7	2,7
11	2,2	1,26	20,48	56,8	2,6
12	2,0	1,19	16,43	63,9	2,5
13	1,9	1,20	10,44	67,6	2,1
14	1,8	1,12	10,30	71,0	2,0
15	1,45	1,58	36,56	81,6	4,1
16	1,2	1,46	31,43	87,4	3,3
17	1,0	1,44	30,56	91,2	2,6

* Проход, после которого проводится промежуточный отжиг.

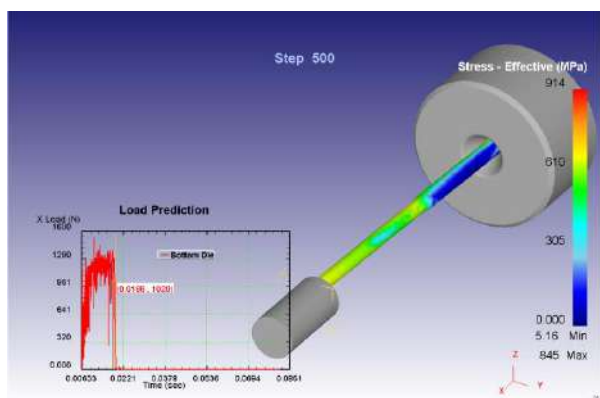
С применением разработанной в программе Deform-3D компьютерной модели процесса волочения [1] (см. табл. 6) проведено его моделирование по предлагаемому режиму обжатий (табл. 8), позволившее учесть влияние параметров волочения на напряжения и силовые характеристики процесса (рис. 6, 7). Результаты расчетов по модели для исследуемого сплава представлены в графическом ви-

де на рис. 7. Анализ представленных данных показывает, что коэффициент запаса η_B по переходам для получения проволоки диаметром до 0,5 мм составляет 1,69, что свидетельствует о высокой стабильности процесса деформации металла при волочении. Величины силы волочения P_B невелики, поэтому силовая нагрузка оборудования находится в допустимых пределах.

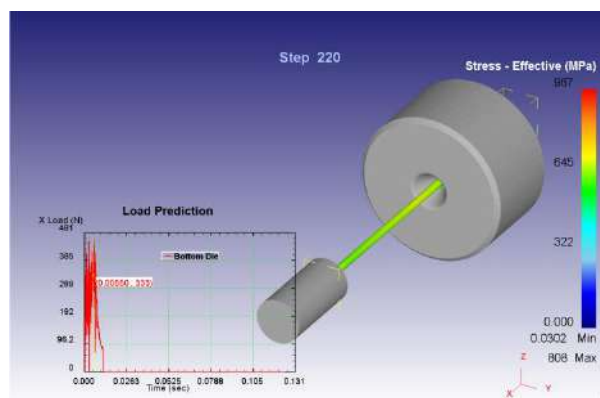
Таблица 8. Предложенный режим волочения для исследуемого сплава палладия

Table 8. The proposed drawing mode for the palladium alloy under study

Номер перехода	Диаметр, мм	$\lambda_{сд}$	$\epsilon_{сд}, \%$	$\epsilon_{\Sigma}, \%$	η_B	$P_B, \text{кН}$
1	1,00	1,27	21,5	21,5	1,77	0,22
2	0,90	1,23	19,1	36,4	1,50	0,26
3	0,80	1,27	21,1	49,8	1,52	0,23
4	0,70	1,30	23,3	61,5	1,58	0,17
5	0,60	1,36	26,5	71,7	1,58	0,12
6	0,50	1,44	30,7	80,4	1,69	0,09



а



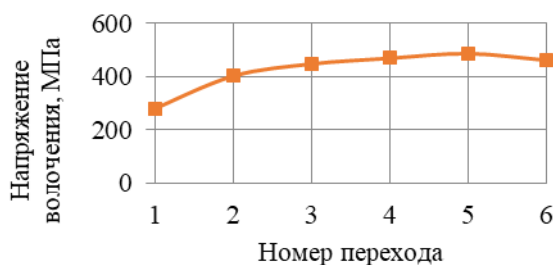
б

Рис. 6. Результаты моделирования процесса волочения проволоки из нового сплава палладия:

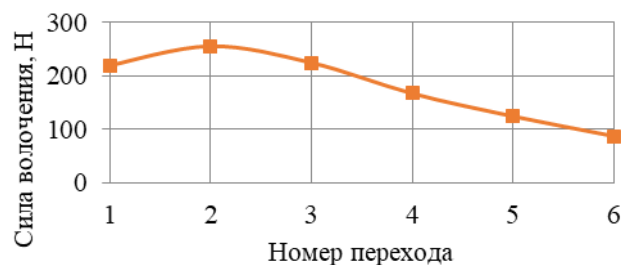
а – распределение напряжений на первом переходе; б – распределение напряжений на шестом переходе

Fig. 6. Simulation of the process of drawing wire from a new palladium alloy:

a is the stress distribution at the first pass; б is the stress distribution at the sixth pass



а



б

Рис. 7. Графики изменения напряжения (а) и силы волочения (б) по переходам

Fig. 7. Graphs of stress changes (a) and drawing force (б) by passes

Анализ распределения напряжений (см. рис. 6) показывает, что максимальные напряжения наблюдаются в калибрующей зоне волокна и их значения не превышают допустимых значений. Полученное распределение значений критерия Кокрофта-Латама по поверхности заготовки (рис. 8) показало достаточно высокий ресурс пластичности проволоки, что позволяет рекомендовать данный маршрут волочения для промышленного опробования.

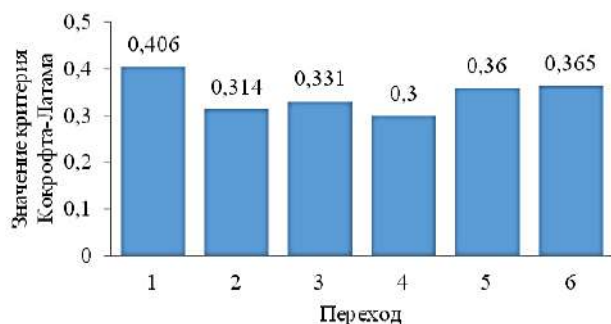


Рис. 8. Значения критерия Кокрофта-Латама по переходам волочения

Fig. 8. Values of the Cockcroft-Latham criterion by drawing passes

Результаты моделирования учитывали при выборе параметров технологического процесса и инструмента, а для их проверки были проведены экспериментальные исследования технологии получения литых и деформированных полуфабрикатов из опытных сплавов в лабораторных условиях на прокатных станах AF 200+180R и LG 200, а также волочильном стане 10 NFS TRONIC. Анализ результатов экспериментальных исследований подтвердил данные моделирования и показал, что для получения из ковальной заготовки размером $x_0 = 15$ мм проволоки диаметром 0,5 мм из нового сплава палладия возможно использование предлагаемых режимов обжатий при прокатке и волочении.

Физико-механические свойства определяли на образцах в деформированном и отожженном при температуре 900°C и выдержке 8 ч состояниях, полученных путем прокатки и волочения (табл. 9) в лабораторных

условиях. Для образцов диаметром 0,5 и 0,7 мм определяли удельное электросопротивление, которое находилось в пределах 20-22 мкОм/см, и микротвердость HV в диапазоне 296-350 кгс/мм².

Металлографические исследования показали, что для литой заготовки характерно дендритное строение, формируемое при кристаллизации. Компоненты, входящие в состав исследуемого сплава, образуют твердые растворы с неограниченной растворимостью в твердом и жидком состояниях. В связи с этим легирующие элементы при литье и кристаллизации заготовки распределяются неоднородно, формируя дендритную структуру. Для снижения неоднородности литой заготовки проводился отжиг при температуре 900°C в течение 8 ч, при этом дендритное строение становится менее выраженным и уменьшается размер дендритных ячеек.

В структуре полуфабрикатов, полученных при прокатке при небольших степенях деформации, сохраняется дендритное строение. С ее увеличением происходит искажение дендритных кристаллов и их вытягивание в направлении деформации (рис. 9, а, б). Изменения, происходящие в структуре, приводят к увеличению значений микротвердости (см. табл. 9).

Деформация заготовок волочением на более значительные степени приводит к формированию волокнистого строения в проволоке. С уменьшением диаметра проволоки зёрна в структуре становятся более тонкими и вытянутыми (рис. 9, в, г). Формирование тонкого волокнистого строения проволоки сопровождается деформационным упрочнением сплава и повышением микротвердости до 350 кгс/мм² (см. табл. 9).

Микрорентгеноспектральный анализ фаз в структуре исследуемых образцов (рис. 10) показал, что в структуре сплава наблюдается неоднородный твердый раствор на основе палладия. В микроструктуре присутствуют светлые и темные участки, в различной степени обогащенные медью, серебром, золотом и платиной. Анализ образца в отожженном состоянии выявил, что неоднородность в распределении легирующих элементов по сечению твердого раствора сохраняется.

Таблица 9. Физико-механические свойства полуфабрикатов из исследуемого сплава

Table 9. Physical and mechanical properties of semi-finished products from the alloy under study

Номер образца	Размер (диаметр), мм, и состояние	Площадь, мм ²	Суммарное обжатие ε_{Σ} , %	Микротвердость HV, кгс/мм ²	Временное сопротивление σ_b , МПа
1	5×5, деформированное	25,0	50	178,7	322
2	3,4×3,4, деформированное	10,2	59,2	163,2	278
3	3,4×3,4, отожженное	—	—	131	—
4	2,2×2,2, деформированное	4,84	80,6	250	470
5	2,2×2,2, отожженное	—	—	190	—
6	∅0,7, деформированное	0,385	92	296	632
7	∅0,5, деформированное	0,196	96	350	777

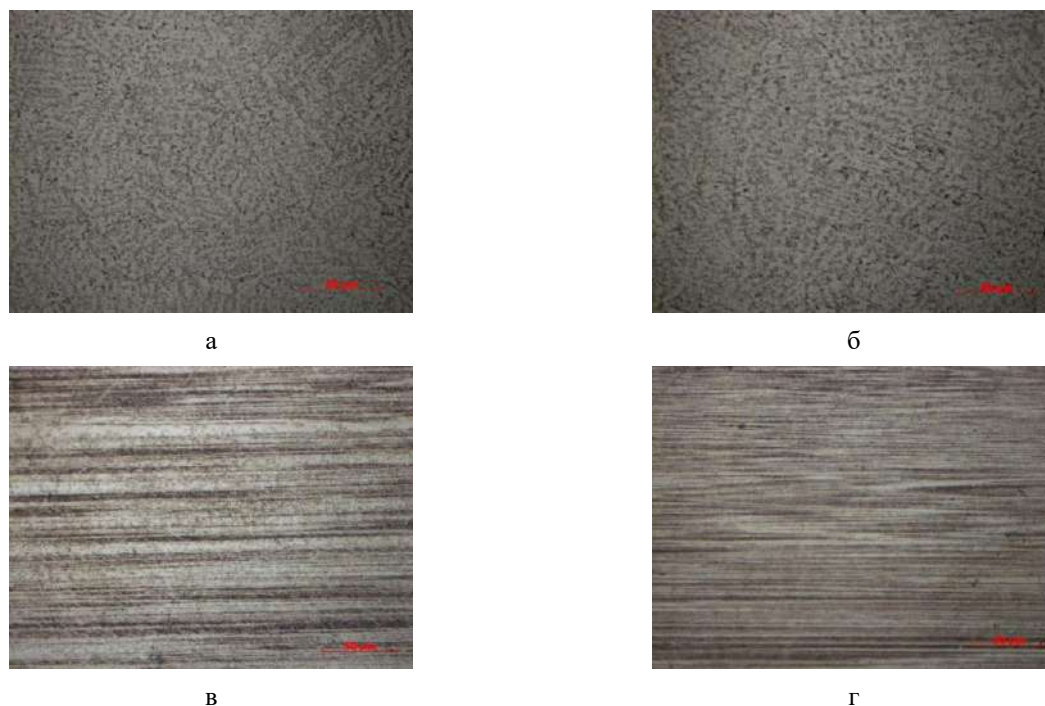
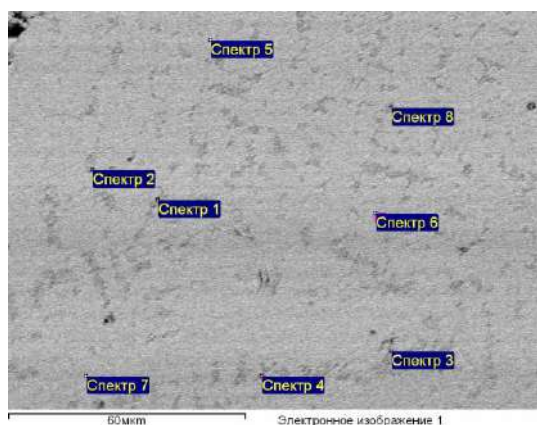


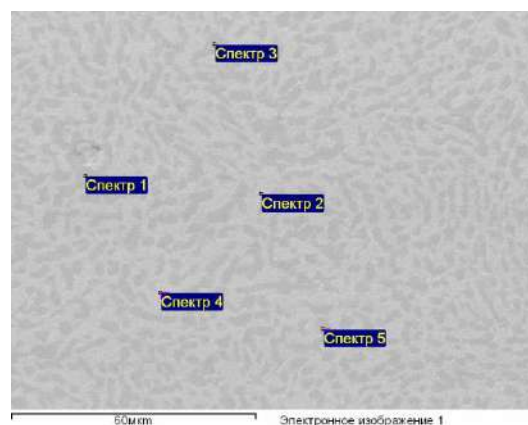
Рис. 9. Микроструктура прутков и проволоки из исследуемого сплава палладия, $\times 500$:
 а – размер $x_i = 3,4$ мм; б – размер $x_i = 2,2$ мм; в – диаметр 0,7 мм; г – диаметр 0,5 мм

Fig. 9. Microstructure of rods and wire made of the palladium alloy under study, $\times 500$:
 a is size $x_i = 3.4$ mm; б is size $x_i = 2.2$ mm; в is a diameter of 0.7 mm; г is a diameter of 0.5 mm



Все результаты в весовых %

Спектр	Cu	Pd	Ag	Au
Спектр 1	35,24	33,82	30,94	0,00
Спектр 2	0,00	35,35	35,22	29,44
Спектр 3	22,15	26,27	29,01	22,57
Спектр 4	17,12	37,51	28,28	17,09
Спектр 5	22,47	38,27	39,26	0,00
Спектр 6	0,00	49,92	50,08	0,00
Спектр 7	46,40	53,60	0,00	0,00
Спектр 8	17,18	26,72	35,04	21,06



Все результаты в весовых %

Спектр	Cu	Pd	Ag	Pt	Au
Спектр 1	22,93	35,78	41,29	0,00	0,00
Спектр 2	0,00	34,35	44,89	0,00	20,76
Спектр 3	0,00	80,00	0,00	20,00	0,00
Спектр 4	0,00	0,00	61,80	0,00	38,20
Спектр 5	25,08	55,98	0,00	18,94	0,00

Рис. 10. Микрорентгеноспектральный анализ образцов сплава палладия в литом (а) и отожженном (б) состояниях
 Fig. 10. X-ray microanalysis of the palladium alloy samples in cast (a) and annealed (б) states

Заключение

Таким образом, для нового сплава палладия проведено моделирование процессов термомеханической обработки и выполнены комплексные исследования физико-механических свойств и структуры металла, результаты которых могут быть использованы при разработке рациональных технологических режимов сортовой прокатки и волочения проволоки для изготовления проволочных контактов.

По их результатам можно сделать следующие выводы:

- для исследуемого сплава палладия получена аппроксимационная формула для расчета временного сопротивления в зависимости от суммарной степени деформации, которая использовалась для моделирования процессов деформации металла в программном комплексе Deform-3D;

- проведено компьютерное моделирование первого этапа сортовой прокатки для получения прутков размером 10,5 мм, характерного только для обработки сплавов на основе палладия, и с использованием этих результатов изучены закономерности формоизменения и напряженно-деформированного состояния металла, силовые параметры и возможность разрушения заготовок при прокатке;

- моделирование и исследование процесса получения проволоки технического назначения из нового сплава палладия показали, что предложенные режимы обжарки при прокатке и волочении позволяют получать длинномерные деформированные полуфабрикаты диаметром до 0,5 мм с требуемым уровнем механических и электрических характеристик;

- металлографические исследования литых и деформированных полуфабрикатов из нового сплава палладия показали, что в микроструктуре присутствуют светлые и темные участки, в различной степени обогащенные медью, серебром, золотом и платиной.

Список источников

1. Технологические основы производства длинномерных литых и деформированных полуфабрикатов из сплавов драгоценных металлов: монография / С.Б. Сидельников, Е.С. Лопатина, Н.Н. Довженко и др. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2022. 204 с.
2. Теория и практика ювелирного дела / Э. Бреполь; под ред. Ю.Н. Баскакова и В.Ф. Каргина. 13-е изд. СПб.: Соло, 2000. 528 с.
3. Благородные металлы: справ. изд. / под ред. Е.М. Савицкого. М.: Металлургия, 1984. 592 с.
4. ГОСТ 30 649–99. Сплавы на основе благородных металлов ювелирные. Марки. М.: Стандартинформ, 2000.
5. Милькина А. Будут ли расти цены на платину и палладий в 2023 году и стоит ли в них инвестировать [Электронный ресурс]. Официальный сайт Банка.ру – финансовый маркетплейс. Режим доступа: <https://www.banki.ru/news/daytheme/?id=10978312>.

6. Рудницкий Э.А., Довженко Н.Н., Ходюков Б.П. Исследование свойств новых палладиевых сплавов и совершенствование технологии их обработки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2009. №3. С. 41–44.
7. Материаловедение. Металловедение палладия и его сплавов: учеб. пособие / В.С. Биронт, Н.Н. Довженко, С.Н. Мамонов и др. Красноярск: ГУЦМиЗ, 2007. 152 с.
8. Рудницкий Э.А. Совершенствование технологии производства проволоки из палладиевых ювелирных сплавов: дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2009. 221 с.
9. Пат. GB861646A Великобритания, МПК C22C. An improved electrical resistance alloy / Alan Sydney Darling, опублик. 28.07.1959.
10. Пат. US5484569A США, МПК C22C30/02. Silver palladium alloy / Arthur S. Klein, Edward F. Smith, III, опублик. 16.01.1996.
11. Пат. 2788879 РФ. Сплав на основе палладия / Сидельников С.Б., Лопатина Е.С., Лопатин В.А. и др.; опублик. 25.01.2023, Бюл. № 3.

References

1. Sidelnikov S.B., Lopatina E.S., Dovzhenko N.N. et al. *Tekhnologicheskie osnovy proizvodstva dlinnomernykh litykh i deformirovannykh polufabrikatov iz splavov dragotsennykh metallov: monografiya* [Technology of production of long cast and deformed semi-finished products from precious metal alloys: monograph]. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2022, 204 p. (In Russ.)
2. Brepol E. *Teoriya i praktika yuvelirnogo dela* [Theory and practice of jewelry]. Saint Petersburg: Solo, 2000, 528 p. (In Russ.)
3. Savitsky E.M. *Blagorodnye metally: sprav. izd.* [Noble metals: reference book]. Moscow: Metallurgiya, 1984, 592 p. (In Russ.)
4. GOST 30 649-99. *Splavy na osnove blagorodnykh metallov yuvelirnye. Marki* [Noble metal-based alloys for jewelry. Grades]. Moscow: Standartinform, 2000. (In Russ.)
5. Milkina A. Will the prices for platinum and palladium rise in 2023 and is it worth investing in them? Available at: <https://www.banki.ru/news/daytheme/?id=10978312>
6. Rudnitsky E.A., Dovzhenko N.N., Khodyukov B.P. Study on the properties of new palladium alloys and improvement of their treatment technology. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2009;(3):41–44. (In Russ.)
7. Biront V.S., Dovzhenko N.N., Mamonov S.N. et al. *Materialovedenie. Metallovedenie palladiya i ego splavov: ucheb. posobie* [Materials science. Metal science of palladium and its alloys: study guide]. Krasnoyarsk: State University of Non-Ferrous Metals and Gold, 2007, 152 p. (In Russ.)

8. Rudnitsky E.A. *Sovershenstvovanie tekhnologii proizvodstva provoloki iz palladievyykh yuvelirnykh splavov: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Improving the technology of wire production from palladium jewelry alloys: PhD (Eng.) thesis]. Krasnoyarsk, 2009, 221 p.
9. Alan Sydney Darling. An improved electrical resistance alloy. Patent GB, no. 861646A, 1959.
10. Arthur S. Klein, Edward F. Smith, III. Silver palladium alloy. Patent US, no. 5484569A, 1996.
11. Sidelnikov S.B., Lopatina E.S., Lopatin V.A. et al. *Splav na osnove palladiya* [Palladium-based alloy]. Patent RU, no. 2788879, 2023.

Поступила 19.12.2023; принята к публикации 06.02.2024; опубликована 28.03.2024
Submitted 19/12/2023; revised 06/02/2024; published 28/03/2024

Сидельников Сергей Борисович – доктор технических наук, профессор, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: sbs270359@yandex.ru. ORCID 0000-0002-5611-2808

Лопатина Екатерина Сергеевна – кандидат технических наук, доцент, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: eslopatina@mail.ru. ORCID 0000-0002-1604-1857

Лопатин Владимир Александрович – аспирант, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: lopatin9028@mail.ru. ORCID 0009-0005-4179-0920

Беляев Сергей Владимирович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой литейного производства, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: 244812@mail.ru. ORCID 0000-0002-7495-1509

Арнаутв Александр Дмитриевич – кандидат технических наук, доцент, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: goodmorner@gmail.com. ORCID 0000-0002-2631-9920

Дитковская Юлия Дмитриевна – кандидат технических наук, доцент, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: yulianomennescio@bk.ru. ORCID 0009-0003-9913-0023

Sergey B. Sidelnikov – DrSc (Eng.), Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: sbs270359@yandex.ru. ORCID 0000-0002-5611-2808

Ekaterina S. Lopatina – PhD (Eng.), Associate Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: eslopatina@mail.ru. ORCID 0000-0002-1604-1857

Vladimir A. Lopatin – postgraduate student, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: lopatin9028@mail.ru. ORCID 0009-0005-4179-0920

Sergey V. Belyaev – DrSc (Eng.), Professor, Head of the Foundry Department, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: 244812@mail.ru. ORCID 0000-0002-7495-1509

Aleksandr D. Arnautov – PhD (Eng.), Associate Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: goodmorner@gmail.com. ORCID 0000-0002-2631-9920

Yuliya D. Ditkovskaya – PhD (Eng.), Associate Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: yulianomennescio@bk.ru. ORCID 0009-0003-9913-0023

ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

MATERIAL PROCESS ENGINEERING

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

УДК 621.941.01

DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-1-61-75



АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СТОЙКОСТИ ИНСТРУМЕНТА И АВТОКОЛЕБАНИЙ ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ ШКИВОВ

Генералова А.А., Никулин А.А., Бычков Д.С.

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Токарная обработка является одним из основных методов обработки тел вращения. Вибрации во время точения могут серьезно нарушить целостность поверхности, а вместе с тем наравне с такими параметрами процесса, как состояние режущей кромки обрабатываемого инструмента, скорость процесса обработки, подача, глубина резания, формируют морфологию поверхности и, главным образом, шероховатость и волнистость поверхности. Для определения и прогнозирования параметра волнистости необходимо знать такой параметр вибраций, как амплитуда автоколебаний. Амплитуда автоколебаний является составляющим параметром уравнения стойкости режущего инструмента и может быть получена путём решения дифференциального уравнения. Однако для решения этого уравнения необходимы значительные вычислительные ресурсы. В этой связи эффективным является разработка и использование аналитических подходов для решения дифференциального уравнения. **Цель работы.** Разработать аналитический подход для определения величины автоколебаний на основе уравнения коэффициента изменения стойкости резца при чистовом точении. **Используемые методы.** Получены некоторые уравнения для амплитуды колебаний в зависимости от скорости резания, частоты колебаний и показателя относительной стойкости резца, а также определены и описаны их решения относительно амплитуды в виде корней полиномов. **Новизна.** В работе предложен подход для определения волнистости поверхности путём аналитической оценки амплитуды автоколебаний в зависимости от режимов резания. Экспериментальная проверка предложенного подхода производилась на шкивах бесступенчатой трансмиссии. **Результат.** Предложена математическая зависимость технологического обеспечения качества поверхностного слоя деталей клиноремённой трансмиссии, формируемого в процессе токарной обработки, которая позволяет прогнозировать высотные параметры волнистости в зависимости от изменения частоты вращения шпинделя, подачи и скорости резания. **Практическая значимость.** Исследование направлено на повышение качества обработки и создание на поверхности детали микропрофиля с регулярной волнистостью, что позволит уменьшить время обработки путём снижения количества технологических операций.

Ключевые слова: коэффициент стойкости, амплитуда, автоколебания, точение, волнистость поверхности, шкив

© Генералова А.А., Никулин А.А., Бычков Д.С., 2024

Для цитирования

Генералова А.А., Никулин А.А., Бычков Д.С. Аналитическое исследование характеристик стойкости инструмента и автоколебаний при токарной обработке шкивов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №1. С. 61-75. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-61-75>



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

ANALYTICAL STUDY ON THE CHARACTERISTICS OF TOOL DURABILITY AND SELF-OSCILLATIONS DURING PULLEY TURNING

Generalova A.A., Nikulin A.A., Bychkov D.S.

Penza State University, Penza, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). Turning is one of the main methods of machining bodies of rotation. Vibrations during turning can seriously disrupt the integrity of the surface, and at the same time, along with such process parameters as the state of the cutting edge of the machining tool, the speed of the machining process, feed, and cutting depth, form the morphology of the surface, and, mainly, roughness and waviness of the surface. To determine and predict the waviness parameter, it is necessary to know such vibration parameter as the amplitude of self-oscillations. The amplitude of self-oscillation is a component parameter of the equation of cutting tool durability and can be obtained by solving the differential equation. However, solving this equation requires significant computing resources. In this regard, it is efficient to develop and use analytical approaches to solve the differential equation. **Objectives.** The research is aimed at developing an analytical approach to determine the value of self-oscillations based on the equation for the coefficient of change in cutting tool durability during finishing turning. **Methods Applied.** The authors obtained some equations for the amplitude of oscillations depending on cutting speed, the frequency of oscillations and the index of relative durability of the cutting tool, and determined and described their solutions for the amplitude in the form of polynomial roots. **Originality.** The paper proposes an approach for determining waviness of the surface by analytical estimation of the amplitude of self-oscillations depending on the cutting modes. The proposed approach was experimentally tested on the pulleys of a continuously variable transmission. **Result.** The paper describes a proposed mathematical relation of the technological quality assurance for the surface layer of the V-belt transmission components formed during turning to predict the height parameters of waviness depending on the change in the spindle speed, feed and cutting speed. **Practical Relevance.** The research is aimed at improving the quality of machining and forming a microprofile with regular waviness on the surface of the part, contributing to a reduction in machining time by reducing the number of technological operations.

Keywords: coefficient of durability, amplitude, self-oscillations, turning, surface waviness, pulley

For citation

Generalova A.A., Nikulin A.A., Bychkov D.S. Analytical Study on the Characteristics of Tool Durability and Self-Oscillations During Pulley Turning. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 1, pp. 61-75. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-61-75>

Введение

Проблема повышения качества изделий и производительности обработки современных материалов тесно связана с вопросом устойчивости процесса резания. Возникающие в процессе резания вредные неуправляемые автоколебания (вибрации) приводят к резкому снижению точности обработки, ухудшению качества поверхности, снижению циклической прочности и надёжности обрабатываемых деталей. С другой стороны, использование таких колебаний с постоянной оптимальной амплитудой в ряде случаев может способствовать улучшению обрабатываемости и повышению качества обработанной поверхности.

Первыми крупными работами, положившими начало углубленному исследованию вибраций при резании металлов, явились работы Дроздова Н.А. [1], Каширина А.И. [2] и А.П. Соколовского [3]. Несмотря на различный подход к причинам возникновения вибраций, авторы теоретически и экспериментально доказали, что при резании металлов имеет место автоколебательный процесс. Автоколебания влияют на

интенсивность износа и прочность режущего инструмента, на точность, волнистость и шероховатость обработанных поверхностей [4]. С увеличением амплитуд автоколебаний пропорционально ухудшаются параметры шероховатости, растёт высота волнистости W_z обработанной поверхности. Волнистость поверхности изучена менее всего, хотя сведения о ней встречаются в технической литературе очень давно. Она занимает промежуточное положение между отклонениями формы и шероховатостью.

В научной литературе можно встретить ряд формул, в которых установлена функциональная связь между волнистостью поверхности и амплитудой автоколебаний. При механических методах обработки на образование волнистости в общем случае оказывают влияние следующие факторы [5, 6]: исходное состояние поверхностного слоя обрабатываемой заготовки H_1 ; биение заготовки и инструмента H_2 ; геометрия режущего инструмента и кинематика его движения H_3 . В зависимости от методов и условий обработки степень влияния этих параметров на свойства волнистости будет различной. Средняя высота

волнистости W_z , формирующейся на поверхности при токарной обработке, может быть вычислена путем суммирования случайных величин по следующей формуле:

$$W_z = 1,2\sqrt{H_1^2 + H_2^2 + H_3^2}, \quad (1)$$

где W_z – высотный параметр волнистости, мкм; H_1 – исходное состояние поверхностного слоя обрабатываемой заготовки; H_2 – биение заготовки и инструмента; H_3 – геометрия режущего и инструмента и кинематика его движения.

В исследовании Лопоток Т.С. [7] приведена зависимость для волнистости поверхности W_z применительно к технологическому процессу врезного цилиндрического шлифования с выхаживанием:

$$W_z = C_0 \left\{ 1 + \cos \left[(s-1) \cdot \frac{180}{y} \right] \right\}, \quad (2)$$

где C_0 – амплитуда главного колебания, мкм; s – число оборотов при врезном цилиндрическом шлифовании с выхаживанием; y – знаменатель рациональной дроби, отвечающий за целое число оборотов.

Соколовский А.П. [3] в результате проведённых экспериментов и расчётов получил адекватные математические модели, отображающие зависимость высоты волнистости среднеарифметического отклонения профиля от интенсивности автоколебаний:

$$W_z = 23,5 + 15,5X_1 - 3,2X_2, \quad (3)$$

где $X_1 = [(A-60)/45,5]$ мкм; $X_2 = [(f-600)/200]$ Гц. Зависимость Соколовского справедлива для процесса фрезерования концевыми фрезами.

В результате многочисленных экспериментальных исследований по измерению параметров волнистости поверхности и частоты автоколебаний при токарной обработке Жарковаты И.Г. [8] получена эмпирическая зависимость средней высоты волнистости W_z от амплитуды автоколебаний A [6]:

$$W_z = C_{wz} A^{\lambda_{wz}}, \quad (4)$$

где C_{wz} – динамический коэффициент, зависящий от твёрдости обрабатываемого металла; λ_{wz} – динамический коэффициент, определяющий процесс стружкообразования при точении и фрезеровании, зависит от химического состава металла.

Коэффициенты C_{wz} и λ_{wz} некоторых марок сталей представлены в **табл. 1**.

Проведённый обзор литературных источников показал, что исследователи единогласно сходятся во мнении, что основным параметром для определения и прогнозирования такого параметра качества поверхности, как волнистость, является параметр амплитуды автоколебаний при обработке.

Таблица 1. Значения коэффициентов C_{wz} и λ_{wz} [6]
Table 1. Values of coefficients C_{wz} and λ_{wz} [6]

Обрабатываемый материал (в соответствии с ГОСТ РФ)	Коэффициент C_{wz}	Коэффициент λ_{wz}
08X15H5Д2Т	1,33	0,96
12X18H9Т	1,26	0,94
Сталь 40	1,24	0,93
Сталь 45	1,22	0,91

Амплитуда и частота являются основными характеристиками вибрационных процессов. Эти характеристики прежде всего зависят от массы, жесткости и демпфирования системы. Кроме этого, эти характеристики являются основными функциями режущего процесса.

Подходы к определению параметров автоколебаний весьма разнообразны. Они могут базироваться на проведении натурных экспериментов с использованием измерительного оборудования в процессе токарной обработки. Также широкое распространение получили методы, связанные с имитационным моделированием. В то же время во многих исследованиях отмечается, что возникающая амплитуда автоколебаний не имеет постоянного численного значения, то есть постоянно изменяется. В связи с чем необходимо производить численные расчеты для определения фактического значения амплитуды колебаний в зависимости от режимов резания [6, 9].

Существуют различные подходы для экспериментального определения амплитуды колебаний в процессе обработки, они отличаются способами и точностью полученных результатов. В работах [10-12] рассматривается экспериментальный подход, при котором колебания фиксируются с помощью датчиков непосредственно в процессе обработки. Преимуществом данного метода является высокая точность результатов, так как результаты снимаются фактически. В работе [13] рассматривается эксперимент, при котором учитывается не только амплитуда, но и частота колебаний. В работах [14-16] используются сравнительный и экспериментальный подходы, преимуществом является снятие колебаний с широким диапазоном частот в реальном времени.

В работах [17-19] рассматривается моделирование процесса обработки, преимуществом которого является визуализация процесса и снятие параметров колебаний в процессе всего цикла обработки. В научных работах [20, 21] обосновано использование низкочастотных колебаний, представляющих собой комплексное вибрационное воздействие на процесс резания с принудительным удалением твердой стружки с верхней части резца и предотвращением ее образования, обеспечивая при этом наличие заданной шероховатости обрабатываемой поверхности и увеличение периода стойкости резца.

Математическая модель формирования автоколебаний в процессе резания подробно рассмотрена в работе С.Л. Леонова и А.Т. Зиновьева [22]. Их модель позволяет прогнозировать автоколебания и рассчитывать процесс резания на устойчивость. Однако для этой модели необходимо определить её коэффициенты: приведенную массу, демпфирование и жесткость отдельных элементов технологической системы [6].

В работе [23] применяется численный подход (в основе лежит параметр стойкости инструмента) для определения амплитуды колебаний, преимуществом является учет всех возможных факторов, которые могут повлиять на колебания, недостатком является применение данной методики только для комбинированного инструмента при сверлении и фрезеровании, для точения применить невозможно.

В работах [24, 25] рассматривается аналитический подход для вычисления амплитуды колебаний, преимуществом такого подхода является то, что учтено значительное количество факторов, которые могут повлиять на обработку.

В современных статьях и диссертациях рассматриваются колебания заготовки и инструмента при обработке деталей с продольной подачей (либо с поперечной при обработке торцов детали). При обработке конических деталей (например, шкивов) резец движется в двух плоскостях. В этом случае продольная подача должна рассматриваться в совокупности с поперечной, и результирующим значением является их векторная сумма. При этом характер колебаний кардинально меняется, а именно присутствуют колебания по двум осям, которые накладываются друг на друга и образуют микрорельеф на детали сложного геометрического профиля. Поэтому адаптивное управление автоколебательного процесса позволит существенно улучшить показатели процесса резания путём проектирования режущего инструмента, рассчитанного на этот процесс, а также отсутствие методик и математических моделей, учитывающих автоколебания на стадии разработки технологического процесса обработки.

Для прогнозной оценки необходимо будет установить аналитические зависимости параметров автоколебаний от режимов точения. Довольно трудно точно сказать, какие эффекты будут приоритетными для того, чтобы сделать определенные допущения и построить адекватную теоретическую зависимость. В качестве основы было решено использовать эмпирическую модель для износостойкости инструмента в зависимости от параметров резания. Это необходимо для определения взаимосвязей выбранных параметров точения, а именно скорости резания, подачи и времени обработки, с возникающими автоколебаниями для создания прогнозной оценки работы инструмента и параметров качества поверхности.

Материалы и методы исследования

Исследования показывают, что период стойкости режущего инструмента в значительной степени опре-

деляется вибрациями при резании. Первым, кто указал на важность изучения колебаний при резании металлов, был Ф. Тейлор [26]. В своём крупном научном труде (1907 год) по резанию металлов он так отозвался о явлениях вибрации при резании металлов: «Вопрос относительно возникновения вибрации дрожания резцов представляется самым тёмным и самым тонким из всех, с которыми приходится иметь дело рабочему. При обработке отливок и поковок самых разнообразных форм нельзя установить никакого правила или формулы, руководствуясь которыми рабочий мог бы брать наибольшую подачу и глубину резания, не опасаясь дрожания». Тейлор отметил, что увеличение глубины резания оказывает минимальное влияние на срок службы инструмента, увеличение подачи влияет чуть больше, а наиболее важным фактором является высокая скорость резания [26].

Стойкость и производительность инструмента в значительной мере определяется уровнем интенсивности автоколебаний. Снижение стойкости происходит за счёт циклического изменения нагрузки и скоростного режима, которые действуют напрямую на режущую кромку. На **рис. 1** приведены кривые, которые демонстрируют влияние колебаний на скорость резания и интенсивность износа [27].

Изменение стойкости в течение одной волны колебаний (с частотой колебаний f и периодом одного колебания $1/f$) соответствует отношению площадей под кривыми 1 и 2 (**рис. 1, а**).

Кривая 1 на **рис. 1, а** представляет изменение скорости резания за один период колебаний, а прямая 2 соответствует скорости резания в отсутствие колебаний. Интенсивность износа при резании в отсутствие колебаний, соответствующая скорости v_0 , представляется тангенсом наклона прямой OL (**рис. 1, б**), где OB – период роста износа; BC – период спада износа; CC_1 – период возрастания износа (предшествует участку OB); OL – динамика износа при резании в отсутствие колебаний; BM – касательная, наклон которой характеризует динамику износа на участке с наибольшей скоростью резания; CK – касательная, наклон которой характеризует динамику износа при минимальной скорости резания. С увеличением действительной скорости резания происходит увеличение интенсивности износа до значения, определяемого точкой B . Здесь скорость резания v максимальна, соответствующая ей интенсивность износа, представленная наклоном касательной BM , тоже максимальна. Дальнейшее уменьшение скорости резания уменьшает интенсивность износа до величины, характеризующейся касательной CK , угол наклона которой меньше, чем угол наклона линии OL . Это означает, что уменьшение скорости резания при отрицательной полуволне колебаний уменьшает интенсивность износа. В результате в процессе резания в течение одного цикла колебаний инструмент на некотором участке получает износ I_1 , больший, чем износ I при скорости v_0 .

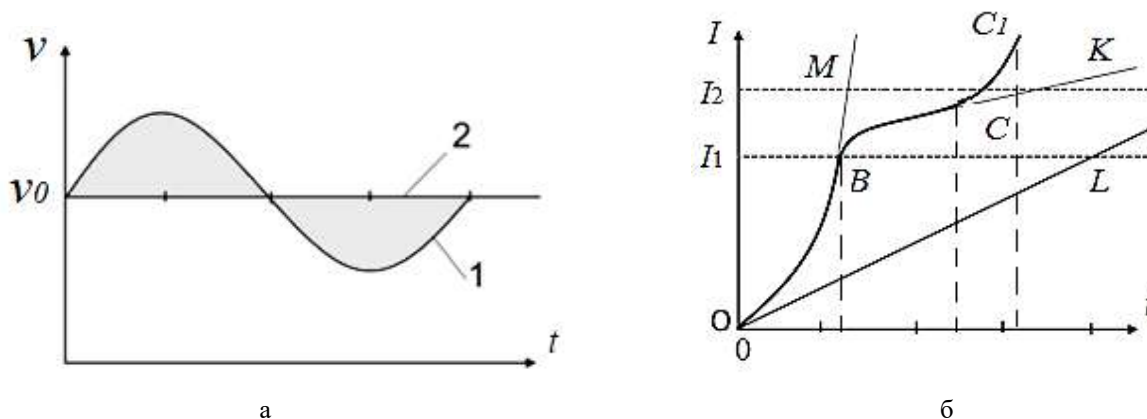


Рис. 1. Кривые динамики скорости резания и износа резца: а – графики скорости резания за один период колебаний: кривая 1 – динамика скорости резания при резании с колебаниями (за один период колебаний); прямая 2 – динамика скорости резания в отсутствие колебаний; б – кривые износа резца за один период колебаний

Fig. 1. Curves of trends in cutting speed and cutting tool wear: а are graphs of cutting speed for one period of oscillations; curve 1 is a trend in cutting speed when cutting with oscillations (for one period of oscillations); straight line 2 is a trend in cutting speed without oscillations; б are curves of cutting tool wear for one period of oscillations

Способность режущего инструмента сохранять работоспособными свои контактные поверхности и лезвия называют стойкостью инструмента, а время, в течение которого это происходит, – периодом стойкости. Зависимости между скоростями резания v и периодом стойкости инструмента следующие [13, 24, 26, 28, 29]:

$$v_0 = \frac{C_v}{T_0^m}, \quad (5)$$

$$v_B = \frac{C_v}{T_B^m}, \quad (6)$$

где v_0 – скорость «спокойного» резания, мм/мин; v_B – скорость резания при колебаниях, мм/мин; C_v – коэффициент, зависящий от механических свойств обрабатываемого и инструментального материалов, геометрии резца и т.д.; T_0 – стойкость инструмента при спокойном резании, мин; T_B – стойкость инструмента при колебаниях, мин.

Из зависимостей (5) и (6) можно получить соотношение стойкостей инструмента:

$$\frac{T_0}{T_B} = \left(\frac{v_B}{v_0}\right)^{\frac{1}{m}}, \quad (7)$$

где m – показатель относительной стойкости, характеризующий влияние стойкости на скорость резания.

Следовательно, изменение стойкости T_B инструмента при колебаниях по сравнению со стойкостью инструмента T_0 при спокойном резании определяется выражением для коэффициента изменения стойкости n :

$$n = \frac{\int_{t=0}^{t=\frac{1}{f}} (v_0)^{\frac{1}{m}} dt}{\int_{t=0}^{t=\frac{1}{f}} (v_B)^{\frac{1}{m}} dt}, \quad (8)$$

где f – частота колебаний, Гц; n – коэффициент изменения стойкости; t – время резания, мин.

Учитывая, что скорость v_0 не изменяется во времени, площадь под ней является прямоугольником со сторонами $(v_0)^{\frac{1}{m}}$ и $\frac{1}{f} = t$, следовательно, интеграл в знаменателе можно записать по формуле

$$\int_{t=0}^{t=\frac{1}{f}} (v_0)^{\frac{1}{m}} dt = (v_0)^{\frac{1}{m}} \cdot \frac{1}{f} = \frac{(v_0)^{\frac{1}{m}}}{f}. \quad (8a)$$

Интеграл в числителе является площадью под периодической функцией осциллирующей относительно положения равновесия v_0 , то есть $v_B = v_0 + \frac{d}{dt}(0,06 \cdot A \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t))$. Дифференциал периодической функции нужен для того, чтобы при интегрировании остался чистый синус без дополнительных множителей, искажающих заданную амплитуду. Коэффициент 0,06 – это коэффициент перевода амплитуды колебаний из мм/с в м/мин, то есть $\frac{60}{1000}$.

Тогда интеграл принимает следующий вид:

$$\int_{t=0}^{t=\frac{1}{f}} (v_B)^{\frac{1}{m}} dt = \int_{t=0}^{t=\frac{1}{f}} (v_0 + 0,06 \cdot A \cdot 2\pi \cdot f \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t))^{\frac{1}{m}} dt, \quad (8b)$$

где A – амплитуда, мм.

Подставив зависимости (8а) и (8б) в уравнение (8), получим математическую зависимость для коэффициента изменения стойкости n :

$$n = \frac{f}{(v_0)^{\frac{1}{m}}} \int_{t=0}^{\frac{1}{f}} (v_0 + 0,06 \cdot A \cdot 2\pi \cdot f \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t))^{\frac{1}{m}} dt. \quad (9)$$

В данной статье предлагается аналитический подход для решения уравнения определения коэффициента изменения стойкости n и амплитуды автоколебаний A .

Приведение уравнения показателя изменения стойкости от тригонометрического вида к виду с использованием рядов

Первым шагом для решения уравнения (9) запишем его с использованием бинома Ньютона [30], сделав замену $q = \frac{1}{m}$. Тогда получим

$$n = \frac{f}{(v_0)^q} \int_{t=0}^{\frac{1}{f}} \sum_{k=0}^q \binom{q}{k} (v_0)^{q-k} \times (0,06 \cdot A \cdot 2\pi \cdot f \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t))^k dt, \quad (9а)$$

где q, k – биномиальные коэффициенты.

Учитывая, что интеграл суммы равен сумме интегралов, а также что биномиальные коэффициенты не зависят от переменной интегрирования и их можно вынести за знак интеграла, получаем общую формулу для вычисления коэффициента изменения стойкости:

$$n = \frac{f}{(v_0)^q} \sum_{k=0}^q \binom{q}{k} \int_{t=0}^{\frac{1}{f}} (v_0)^{q-k} \times (0,06 \cdot A \cdot 2\pi \cdot f \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t))^k dt. \quad (9б)$$

Величина $(v_0)^{q-k}$ также не зависит от переменной интегрирования (от t), поэтому её можно вынести за пределы интеграла и внести под сумму коэффициент перед суммой $\frac{1}{(v_0)^q}$. После соответствующих упрощений формула принимает вид

$$n = f \sum_{k=0}^q \binom{q}{k} \frac{1}{(v_0)^k} \times \int_{t=0}^{\frac{1}{f}} (0,06 \cdot A \cdot 2\pi \cdot f \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t))^k dt. \quad (9в)$$

Вынесем коэффициенты за знак интеграла, так как они не зависят от переменной интегрирования:

$$n = f \sum_{k=0}^q \binom{q}{k} \left(\frac{0,06 \cdot A \cdot 2\pi \cdot f}{v_0} \right)^k \int_{t=0}^{\frac{1}{f}} \cos^k(2\pi \cdot f \cdot t) dt. \quad (9г)$$

В данном случае можно воспользоваться формулой редукции степени [31] для вычисления подынтегральной части и переписать исходное равенство для коэффициента изменения (избытка/недостатка) стойкости в следующем виде, подставив пределы интегрирования и сократив подобные:

$$n = 1 + \sum_{k=1}^q \binom{q}{k} \left(\frac{0,06A \cdot 2\pi f}{v_0} \right)^k \cdot \begin{cases} \prod_{r=1}^{\frac{k}{2}} \left(1 - \frac{1}{2r} \right), & \text{при } k = 0 \pmod{2} \\ 0, & \text{при } k = 1 \pmod{2} \end{cases}. \quad (9д)$$

Здесь можно заметить, что в сумме участвуют только четные степени, а нечетные «обнуляются»:

$$n = 1 + \sum_{\substack{k=2 \\ k \in 2Z}}^q \binom{q}{k} \left(\frac{0,06A \cdot 2\pi f}{v_0} \right)^k \cdot \prod_{r=1}^{\frac{k}{2}} \left(1 - \frac{1}{2r} \right). \quad (9е)$$

Меняя границы суммирования, оставим суммирование лишь по четным степеням:

$$n = 1 + \sum_{k=1}^{\lfloor \frac{q}{2} \rfloor} \binom{q}{2k} \left(\frac{0,06A \cdot 2\pi f}{v_0} \right)^{2k} \cdot \prod_{r=1}^k \left(1 - \frac{1}{2r} \right). \quad (9ж)$$

Скобки вида $\lfloor \cdot \rfloor$ означают округление до ближайшего меньшего целого.

Далее запишем уравнение для n через гамма-функцию Эйлера $\Gamma(\cdot)$ [32]:

$$n = 1 + \sum_{k=1}^{\lfloor \frac{q}{2} \rfloor} \binom{q}{2k} \left(\frac{0,06A \cdot 2\pi f}{v_0} \right)^{2k} \cdot \frac{\Gamma\left(k + \frac{1}{2}\right)}{k! \cdot \sqrt{\pi}}. \quad (9з)$$

В случае гамма-функции известно решение через элементарные функции для гамма-функции с полупримерным аргументом:

$$n = 1 + \sum_{k=1}^{\lfloor \frac{q}{2} \rfloor} \binom{q}{2k} \left(\frac{0,06A \cdot 2\pi f}{v_0} \right)^{2k} \cdot \frac{(2k)!}{(k!)^2 \cdot 4^k}. \quad (9и)$$

Вместе с биномиальными коэффициентами

$$n = 1 + \sum_{k=1}^{\lfloor \frac{q}{2} \rfloor} \left[\frac{1}{2^{2k}} \cdot \frac{q!}{(q-2k)! \cdot (k!)^2} \cdot \left(\frac{60 \cdot A \cdot 2\pi f}{1000 \cdot v_0} \right)^{2k} \right]. \quad (9к)$$

Получение формулы приближенного вычисления членов ряда

Для некоторых задач удобно пользоваться приближенным вычислением данных членов ряда, это

потенциально сокращает время и ресурсы ЭВМ, для получения приближенного равенства представим члены последовательности в виде произведения двух частей (множителей):

– рациональной части, представленной дробью с целыми числами в числителе и знаменателе

$$P(q, k) = \frac{1}{2^{2k}} \cdot \frac{q!}{(q-2k)! \cdot (k!)^2};$$

– иррациональной части, представленной дробью с иррациональностью $\left(\frac{60 \cdot A \cdot 2\pi f}{1000 \cdot v_0}\right)^{2k}$.

Прологарифмируем отдельно иррациональную часть из уравнения (9к):

$$\ln\left(\left(\frac{60 \cdot A \cdot 2\pi f}{1000 \cdot v_0}\right)^{2k}\right) = 2k \cdot \ln\left(\frac{60 \cdot A \cdot 2\pi f}{1000 \cdot v_0}\right).$$

Прологарифмируем отдельно рациональную часть из уравнения (9к):

$$\ln\left(\frac{1}{2^{2k}} \cdot \frac{q!}{(q-2k)! \cdot (k!)^2}\right) = \ln\left(\frac{1}{2^{2k}}\right) + \ln\left(\frac{q!}{(q-2k)! \cdot (k!)^2}\right).$$

Для рациональной части уравнения раскроем логарифмы и после преобразования получим:

$$\begin{aligned} \ln\left(\frac{1}{2^{2k}} \cdot \frac{q!}{(q-2k)! \cdot (k!)^2}\right) &= \\ &= -2k \cdot \ln(2) + \ln(q!) - \ln((q-2k)!) - 2\ln(k!). \end{aligned}$$

В данном случае для приближённого вычисления факториала и гамма-функции удобнее использовать формулу Муавра-Стирлинга [33], в результате можно получить приблизительное равенство для логарифма рациональной части:

$$\begin{aligned} \ln\left(\frac{1}{2^{2k}} \cdot \frac{q!}{(q-2k)! \cdot (k!)^2}\right) &\approx -(2k+1) \cdot \ln(2k) + \\ &+ \left(q + \frac{1}{2}\right) \cdot \ln(q) - \left(q-2k + \frac{1}{2}\right) \cdot \ln(q-2k) - \ln(\pi). \end{aligned}$$

Так как $2k$ всегда четное, $(-1)^{2k} = 1$ для любого k , то этот логарифм соответствует следующему приближенному равенству:

$$\frac{1}{2^{2k}} \cdot \frac{q!}{(q-2k)! \cdot (k!)^2} \approx \frac{\sqrt{q}}{\pi \cdot 2k \cdot \sqrt{q-2k}} \cdot \frac{\left(1 - \frac{q}{2k}\right)^{2k}}{\left(1 - \frac{2k}{q}\right)^q}.$$

Получение уравнения амплитуды автоколебаний из уравнения показателя изменения стойкости

Определение и измерение коэффициента изменения стойкости n обычно производится опытным путём. Главным образом, данный коэффициент зависит от обрабатываемого металла, материала режущей части резца, толщины среза, вида и условий обработки. Чем интенсивнее и нагруженнее условия резания, тем ниже износостойкость материала режущей части инструмента и тем меньше показатель относительной стойкости, характеризующий влияние стойкости на скорость резания m (для удобства в расчётах введена переменная $q = 1/m$). В справочных источниках по теории резания величина показателя относительной стойкости резца при обработке стали, стального литья и ковкого чугуна может быть принята равной 0,125; для резцов, оснащённых пластинками твёрдых сплавов, $m = 0,125-0,3$ ($m_{cp} = 0,2$); для серого чугуна 0,1 [34]. И в том, и в другом случае принимается токарный резец (проходной) из быстрорежущей стали.

В соответствии с теоремой Руффини-Абея [35], можно гарантированно найти решение в радикалах для квадрата амплитуды A^2 вплоть до $q = 9$, сделав замену $a = A^2$:

$$n = 1 + \sum_{k=1}^{\lfloor \frac{q}{2} \rfloor} \left[P(q, k) \cdot \left(\frac{60 \cdot 2\pi f}{1000 \cdot v_0}\right)^{2k} \cdot a^k \right], \quad (10)$$

где $P(q, k) = \frac{1}{2^{2k}} \cdot \frac{q!}{(q-2k)! \cdot (k!)^2}$ – рациональная часть членов ряда (может быть заменена на формулу приближенного вычисления рациональной части членов ряда $PR(q, k) = \frac{\sqrt{q}}{\pi \cdot 2k \cdot \sqrt{q-2k}} \cdot \frac{\left(1 - \frac{q}{2k}\right)^{2k}}{\left(1 - \frac{2k}{q}\right)^q}$).

Из уравнения (10) можно получить уравнение амплитуды автоколебаний A , если подставить интересное значение q , обратно пропорциональное величине относительной стойкости резца m , приравнять его к нулю и найти корни полученного уравнения.

Для $q = 1$ ($q = 1/m$) решение тривиально: $n = 1$.

Выведем уравнение амплитуды автоколебаний при $q = 2$ ($m = \frac{1}{2}$):

$$n = 1 + P(2, 1) \cdot \left(\frac{60 \cdot 2\pi f}{1000 \cdot v_0}\right)^2 \cdot a, \quad (11)$$

где

$$P(2, 1) = \frac{1}{2^2} \cdot \frac{2!}{(q-2)! \cdot (1!)^2} = \frac{1}{2}.$$

Следовательно,

$$a = 2 \frac{n-1}{\left(\frac{60 \cdot 2\pi f}{1000 \cdot v_0}\right)^2}.$$

Тогда $A = \pm\sqrt{a}$, получаем

$$A = \pm \frac{1000 \cdot v_0}{60 \cdot \sqrt{2} \cdot \pi f} \cdot \sqrt{n-1}.$$

Очевидно, что нас интересуют только положительные корни, так как амплитуда строго не отрицательна:

$$A = \frac{1000 \cdot v_0}{60 \cdot \sqrt{2} \cdot \pi f} \cdot \sqrt{n-1}. \quad (12)$$

Следовательно, $n \geq 1$, чтобы подкоренное выражение $\sqrt{n-1}$ имело вещественные значения.

Установим уравнение амплитуды автоколебаний при $q = 3$ ($m = \frac{1}{3}$):

$$n = 1 + P(3,1) \cdot \left(\frac{60 \cdot 2\pi f}{1000 \cdot v_0}\right)^2 \cdot a, \quad (13)$$

где

$$P(3,1) = \frac{1}{2^2} \cdot \frac{3!}{(3-2)! \cdot (1!)^2} = \frac{3}{2}.$$

Следовательно,

$$a = \frac{2}{3} \frac{n-1}{\left(\frac{60 \cdot 2\pi f}{1000 \cdot v_0}\right)^2}.$$

Так как $A = \pm\sqrt{a}$, очевидно, что нас интересуют только положительные корни, так как амплитуда строго не отрицательна:

$$A = \frac{1000 \cdot v_0}{60 \cdot \sqrt{6} \cdot \pi f} \cdot \sqrt{n-1}. \quad (14)$$

Тогда $n \geq 1$, чтобы $\sqrt{n-1}$ имел вещественные значения.

Установим уравнение амплитуды автоколебаний для $q = 4$ ($m = \frac{1}{4}$):

$$n = 1 + P(4,2) \cdot \left(\frac{60 \cdot 2\pi f}{1000 \cdot v_0}\right)^4 \cdot a^2 + P(4,1) \cdot \left(\frac{60 \cdot 2\pi f}{1000 \cdot v_0}\right)^2 \cdot a, \quad (15)$$

где

$$P(4,1) = \frac{1}{2^2} \cdot \frac{4!}{(4-2)! \cdot (1!)^2} = 3,$$

$$P(4,2) = \frac{1}{2^4} \cdot \frac{4!}{(4-4)! \cdot (2!)^2} = \frac{3}{8}.$$

Следовательно,

$$a = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} = \left(\frac{1000 \cdot v_0}{60 \cdot \pi f}\right)^2 \left(\pm \sqrt{\frac{n+5}{6}} + 1\right).$$

Так как $A = \pm\sqrt{a}$, очевидно, что нас интересуют только положительные корни, так как амплитуда строго не отрицательна. Также амплитуда должна иметь вещественные значения, подкоренное выражение $\pm \sqrt{\frac{n+5}{6}} + 1 \geq 0$ также должно быть неотрицательным. В результате для коэффициента избытка стойкости $n \geq 1$ получаем следующее уравнение для амплитуды автоколебаний A :

$$A = \frac{1000 \cdot v_0}{60 \cdot \pi f} \sqrt{\sqrt{\frac{n+5}{6}} + 1}. \quad (16)$$

Установим уравнение амплитуды автоколебаний для $q = 5$ ($m = \frac{1}{5}$):

$$n = 1 + P(5,2) \cdot \left(\frac{60 \cdot 2\pi f}{1000 \cdot v_0}\right)^4 \cdot a^2 + P(5,1) \cdot \left(\frac{60 \cdot 2\pi f}{1000 \cdot v_0}\right)^2 \cdot a, \quad (17)$$

где

$$P(5,1) = \frac{1}{2^2} \cdot \frac{5!}{(5-2)! \cdot (1!)^2} = 5,$$

$$P(5,2) = \frac{1}{2^4} \cdot \frac{5!}{(5-4)! \cdot (2!)^2} = \frac{15}{8}.$$

Также принимаем во внимание, что значение амплитуды A должно быть неотрицательным и иметь вещественные значения:

$$A = \frac{1000 \cdot v_0}{60 \cdot \pi f} \sqrt{\sqrt{\frac{30 \cdot n + 70}{30}} - 10}. \quad (18)$$

Особый интерес представляет уравнение коэффициента изменения стойкости n при $q = 8$ ($m = \frac{1}{8} = 0,125$), так как такое значение величины показателя относительной стойкости резца рекомендовано при обработке стали, стального литья и ковкого чугуна.

Установим уравнение амплитуды автоколебаний для $q = 8$ ($m = \frac{1}{8}$):

$$n = 1 + \sum_{k=1}^{\lfloor \frac{q}{2} \rfloor} \left[P(q, k) \cdot \left(\frac{60 \cdot 2\pi f}{1000 \cdot v_0} \right)^{2k} \cdot a^k \right],$$

где

$$P(8, 4) \cdot \left(\frac{60 \cdot 2\pi f}{1000 \cdot v_0} \right)^8 \cdot a^4 + P(8, 3) \cdot \left(\frac{60 \cdot 2\pi f}{1000 \cdot v_0} \right)^6 \cdot a^3 + \\ + P(8, 2) \cdot \left(\frac{60 \cdot 2\pi f}{1000 \cdot v_0} \right)^4 \cdot a^2 + P(8, 1) \cdot \left(\frac{60 \cdot 2\pi f}{1000 \cdot v_0} \right)^2 \times \\ \times a + 1 - n = 0.$$

Уточним, что:

$$P(8, 1) = \frac{1}{2^2} \cdot \frac{8!}{(8-2)! \cdot (1!)^2} = \frac{126}{9} = 14,$$

$$P(8, 2) = \frac{1}{2^4} \cdot \frac{8!}{(8-4)! \cdot (2!)^2} = \frac{105}{4} = 26 \frac{1}{4},$$

$$P(8, 3) = \frac{1}{2^6} \cdot \frac{8!}{(8-6)! \cdot (3!)^2} = \frac{35}{4} = 8 \frac{3}{4},$$

$$P(8, 4) = \frac{1}{2^8} \cdot \frac{8!}{(8-8)! \cdot (4!)^2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{315}{576} = \frac{35}{128}.$$

В результате решения уравнения (10) методом Феррари [36] можно записать все восемь корней уравнения с использованием независимых переменных α , β и γ , таких что $\alpha, \beta, \gamma \in \{0, 1\}$:

$$A(\alpha, \beta, \gamma) = (-1)^\gamma \frac{1000 \cdot v_0}{60 \cdot 2\pi f} \times \\ \times \sqrt[3]{(-1)^\alpha \sqrt{\frac{T}{2} + 48} + (-1)^\beta \sqrt{\frac{(-1)^{\alpha+1} \cdot 13056}{10 \cdot \sqrt{2T+2 \cdot 96}} - \frac{T}{2} + 96} - 8}, \quad (19)$$

где α , β и γ – независимые переменные, введенные для унификации записи решения уравнения 8-й степени в радикалах. Величина T является интегральной переменной, в которой $U = \frac{5 \cdot 96 \cdot 128n - 405504}{175}$ и

$$V = \frac{128n - 12672}{35} \quad (U \text{ и } V \text{ находятся решая методом}$$

Кардано [37] кубическое уравнение, приведенное к каноничной форме). Данная величина введена для краткости записи уравнения (19) и вычисляется по зависимости

$$T = \sqrt[3]{-\frac{U}{2} + \sqrt{\frac{V^3}{27} + \frac{U^2}{4}}} + \sqrt[3]{-\frac{U}{2} - \sqrt{\frac{V^3}{27} + \frac{U^2}{4}}}.$$

Таким образом, в результате аналитических вычислений получены частные случаи решения для уравнения коэффициента изменения стойкости n (9). Основными составляющими данного уравнения являются: показатель относительной стойкости m , характеризующий влияние стойкости на скорость резания; частота колебаний f ; амплитуда автоколебаний A ; скорость резания v_0 . Имея численные значения этих технологических параметров, можно определять неизвестные параметры процесса резания, а следовательно, и прогнозировать параметры качества поверхности, такие как шероховатость или волнистость. В данном исследовании предлагается определение высотного параметра волнистости шкива бесступенчатой трансмиссии [6, 38-40]. В качестве эмпирической зависимости для прогнозирования параметров волнистости поверхности выбрана зависимость Жаркова (3) [8].

Полученные результаты и их обсуждение

Для экспериментальной проверки предлагаемого решения уравнения (19) была произведена обработка шкива вариатора. Изготовление производилось на обрабатывающем центре с ЧПУ DMG MORI NTX1000. Для данного оборудования коэффициент изменения стойкости $n = 1,00044$. Обработка исследуемой поверхности шкива проводилась при помощи токарного резца с режущей частью из материала T5K12B. Используемый резец имеет следующие параметры режущей части: главный угол в плане – 30°, передний угол – 10°, угол наклона главного лезвия – 5°, радиус при вершине – 2°. При проведении теоретических расчетов принят диапазон низкочастотных колебаний $f \in 50-300$ Гц [1, 8].

В качестве заготовки для шкивов использовался прокат «Круг» диаметром 180 мм, материал соответствует заложенному производителем – сталь 45 в соответствии со стандартом Российской Федерации. Режимы резания для обработки шкивов чистовым точением приведены в табл. 2 [6].

Экспериментальное исследование полученного микропрофиля шкивов проводилось при помощи профилометра CONTUROMATIC TS, представленного на рис. 2.



Рис. 2. Профилометр CONTUROMATIC TS
Fig. 2. CONTUROMATIC TS Profilometer

Измерение параметров волнистости происходило в 4-х областях, равномерно распределенных по рабочей поверхности шкива [5]. В результате получены следующие волнограммы поверхности (рис. 3). Вер-

тикальные значения волнограмм соответствуют высотному параметру волнистости W_i , горизонтальные значения волнограмм соответствуют шаговому параметру волнистости S_{wi} .

Таблица 2. Параметры процесса обработки
Table 2. Machining process parameters

Параметр обработки	Образец №1	Образец №2	Образец №3
Частота вращения шпинделя станка n_1 , об/мин	1100	1250	1300
Подача s , мм/об	0,39	0,48	0,54
Скорость резания при чистовом точении v , м/мин	182	194	217
Глубина резания t_1 , мм	1	1,2	1,25

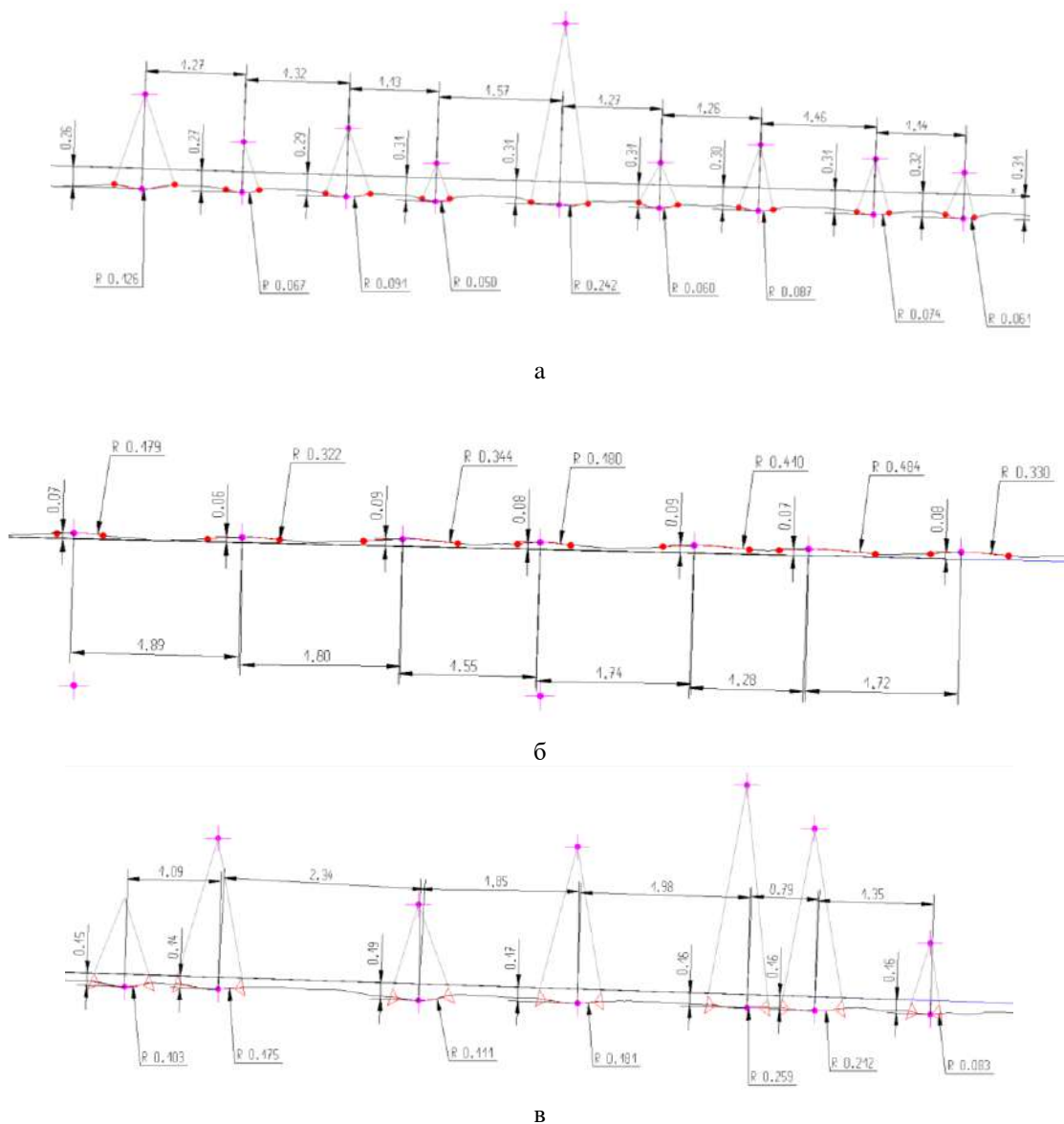


Рис. 3. Волнограммы поверхности ($\times 10^3$ мкм): а – волнограмма образца №1; б – волнограмма образца №2; в – волнограмма образца №3
Fig. 3. Surface waveforms ($\times 10^3$ μm): а is a waveform of sample No. 1; б is a waveform of sample No. 2; в is a waveform of sample No. 3

Также получены фотографии поверхности со шкивов, демонстрирующие качественный характер волнистости (рис. 4). Фотографии получены при помощи цифрового микроскопа GVD с увеличением 1500 раз. Имеющиеся неоднородности на структуре поверхности могут косвенно указывать на наличие автоколебаний, которые присутствуют на всех рассматриваемых плоскостях. Эти автоколебания характеризуются высокой частотой и низкой амплитудой, поэтому на фотографиях с цифрового микроскопа они незаметны по сравнению с оставленным следом резца. Характер их влияния на микрогеометрию шкива детальнее рассмотрен на волнограммах.

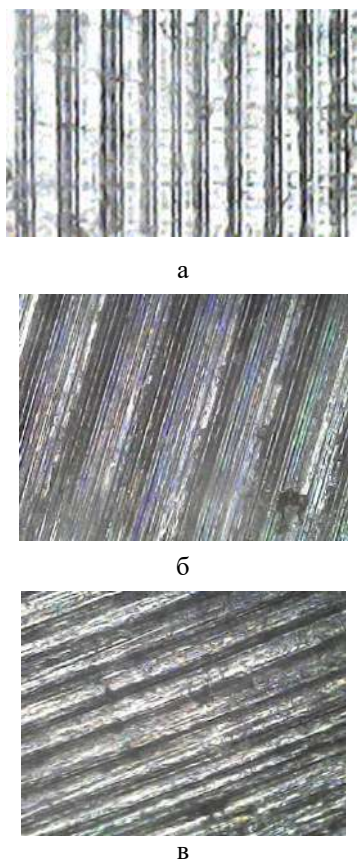


Рис. 4. Фотографии поверхности ($\times 1500$): а – образец №1; б – образец №2; в – образец №3

Fig. 4. Photographs of the surface ($\times 1500$): a is sample No. 1; б is sample No. 2; в is sample No. 3

В соответствии с уравнением (19) получены следующие диапазоны значений амплитуды автоколебаний A :

- образец №1 $A \in 9-54$ мкм;
- образец №2 $A \in 10-58$ мкм;
- образец №3 $A \in 11-65$ мкм.

Характер изменений значений амплитуды автоколебаний A от частоты f для каждой из трех скоростей резания, использованных в эксперименте, показан на рис. 5. Зависимости носят степенной (гиперболический) характер, при возрастании частот до 300 Гц значения амплитуды автоколебаний становятся примерно равными, независимо от скоростей резания v_0 , что мо-

жет свидетельствовать о переходе процесса формирования волнистости к процессу формирования шероховатости поверхности.

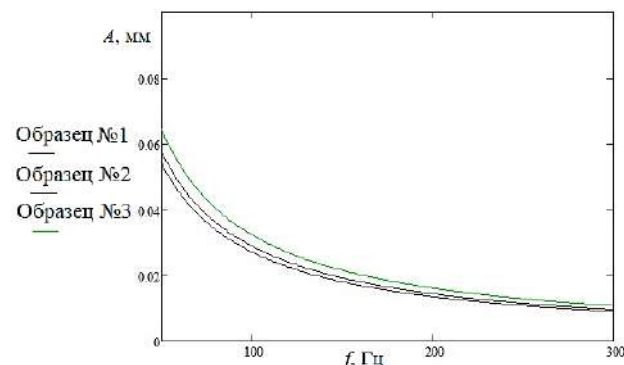


Рис. 5. Значение амплитуд автоколебаний A от частоты f

Fig. 5. The value of amplitudes of self-oscillations A for frequency f

Результаты полученных экспериментальных средних значений высотного параметра волнистости W_z , а также теоретические значения волнистости по формуле Жаркова (3) приведены в табл. 3. В данном исследовании для прогнозной оценки волнистости от амплитуды автоколебаний выбрана формула Жаркова, так как его исследования основывались на точении, и уже установлены эмпирические коэффициенты для аналогичного материала, из которого изготовлены шкивы.

Таблица 3. Результаты исследования микропрофиля шкивов

Table 3. Results of the study on the pulley microprofile

Параметр волнистости	Образец №1	Образец №2	Образец №3
Экспериментальное значение высоты волнистости W_z , мкм	66	117	179
Теоретическое значение высоты волнистости W_z , мкм	14-81	16-86	18-97

Расхождение экспериментальных и теоретических результатов свидетельствуют о том, что волнистость поверхности является результатом не только колебательного процесса при резании, но также следствием геометрических параметров режущего инструмента (в данном случае углов резца). Данное направление является результатом дальнейших исследований.

Анализ полученных результатов позволил судить об адекватности предлагаемого подхода для прогнозирования значений амплитуд автоколебаний. Также результаты исследований позволяют осуществлять научно обоснованный выбор режимов резания ответственных поверхностей деталей машин с учётом требуемых параметров волнистости.

Заключение

Таким образом, в данной статье предложен аналитический подход для определения амплитуды автоколебаний из уравнения коэффициента изменения стойкости резца. Коэффициент износостойкости определяется параметрами технологической обработки и зависит от амплитуды автоколебаний режущего инструмента. Параметры автоколебаний металлорежущего инструмента в процессе токарной обработки формируют параметры качества поверхностного слоя деталей машин, в данном случае шкивов бесступенчатой трансмиссии. Амплитуда автоколебаний может быть определена из коэффициента износостойкости режущего инструмента. В данной работе предложен подход для определения волнистости поверхности путём аналитической оценки амплитуды автоколебаний в процессе обработки в зависимости от режимов резания, а также определены и описаны их решения относительно амплитуды в виде корней полиномов. В качестве экспериментальной проверки методики расчета формируемой волнистости в зависимости от значения амплитуды автоколебаний были изготовлены шкивы вариатора. Оценка полученного микропрофиля производилась посредством снятия волнограмм. Произведено сравнение расчетных значений высотных параметров волнистости и значений, полученных на практике.

Список источников

1. Дроздов Н.А. К вопросу о вибрациях станка при токарной обработке // Станки и инструмент. 1937. №22. С. 21-25.
2. Каширин А.И. Исследование вибраций при резании металлов. М.; Л.: Изд-во Акад. наук СССР, 1944. 132 с.
3. Соколовский А.П. Жесткость в технологии машиностроения. М.; Л.: Изд. и 1-я тип. Машгиза в Лгр., 1946. 207 с.
4. Gugulothu S., Pasam V.K. Optimizing Multi-Response Parameters in Turning of AISI1040 Steel Using Desirability Approach // International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences. 2019, vol. 4, no. 4, pp. 905-921. DOI: <https://dx.doi.org/10.33889/IJMEMS.2019.4.4-072>
5. Generalova A., Zverovshchikov A., Nikulin A. Surface undulation parameters of continuously variable transmission friction during turning // Journal of King Saud University – Engineering Sciences. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2022.06.001>.
6. Генералова А.А., Зверовщиков А.Е., Никулин А.А. Влияние автоколебаний в процессе токарной обработки на формирование волнистости шкивов автомобильных вариаторов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2022. №4. С. 108-121. DOI: 10.21685/2072-3059-2022-4-9
7. Лоповок Т.С. Волнистость поверхности и ее измерение. М.: Изд-во стандартов, 1973. 184 с.
8. Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом. Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1986. 179 с.
9. Кедров С.С. Колебания металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1978. 199 с.
10. Martinova L.I., Grigoryev A.S., Sokolov S.V. Diagnostics and Forecasting of Cutting Tool Wear at CNC Machines // Autom. RemoteControl. 2012, vol. 73, no. 4, pp. 742-749.
11. A Tool Condition Monitoring System Based on Low-Cost Sensors and an IoT Platform for Rapid Deployment / Johanna M.F. et al. // Processes. 2023, vol. 11, no. 3, p. 668. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr11030668>
12. Displacements Analysis of Self-Excited Vibrations inTurning / Bisu C.D. et al. // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2009, vol. 44, no. 1-2, pp. 1-16.
13. Prediction of Cutting Material Durability by T = f(vc) Dependence for Turning Processes / Jozef Zajac et al. // Processes. 2020, vol. 8, p. 789. DOI: 10.3390/pr8070789
14. Dynamic characterization of machining systems / Zapciu M. et al. // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2011, no. 57, pp. 73-83. DOI: 10.1007/s00170-011-3277-7
15. Molchanov A., Zaytzev A.N., Alexandrova Yu. P. Identification of the self-oscillating mode in metal-cutting machines in the production of agricultural machinery // VIII International Conference on Advanced Agritechnologies, Environmental Engineering and Sustainable Development. Krasnoyarsk, 2023, vol. 390. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339006009>
16. Altintas Y. Manufacturing Automation: Metal cutting mechanics, machine tool vibrations and CNC design. New York, 2000. 286 p.
17. Synthetic Minority Oversampling Enhanced FEM for Tool Wear Condition Monitoring / Yuqing Zhou et al. // Processes. 2023, vol. 11, no. 6, pp. 1785. DOI: 10.3390/pr11061785
18. Tool Wear Condition Monitoring Based on a Two-layer Angle Kernel Extreme LearningMachine using Sound Sensor for Milling Process / Zhou Y.Q. et al. // Journal of Intelligent Manufacturing. 2022, vol. 33, pp. 247-258.
19. Korendysev G. An approach to modeling self-oscillations during metal machining based on a finite-element model with small amount of computing resources // Vibroengineering PROCEDIA. 2020, vol. 32, pp. 6-12. DOI: 10.21595/vp.2020.21437
20. Prospects for the use of vibration during cutting material / Omelyanov O. // Vibrations in Engineering and Technology. 2021, vol. 1, pp. 10. DOI: 10.37128/2306-8744-2021-1-10
21. Yilmaz B., Karabulut Ş., Cüllü A. A review of the chip breaking methods for continuous chips in turning // Journal of Manufacturing Processes. 2020, vol. 49, pp. 50-69. DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.10.026

22. Леонов С.Л., Зиновьев А.Т. Основы создания имитационных технологий прецизионного формообразования. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2006. 198 с.
23. Sokolova I.D., Beckel L.S., Pilipushko A.Y. Mathematical model of changing the combined cutting tool durability // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021, vol. 1047, Iss. 1. DOI: 10.1088/1757-899X/1047/1/012013
24. Vasilkov D., Tarikov I.Y., Nikitin A.V. The Dynamics of Contact Interaction during the Cutting Process // International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences. 2019, vol. 4, no. 5, pp. 1218-1227. DOI: 10.33889/IJMEMS.2019.4.5-096
25. Influence of cutting modes on wear resistance of cutters and accuracy of fine boring of steels / Orgiyana A. et al. // Proceedings of Odessa Polytechnic University. 2021, vol. 2, no. 64, pp. 13-21.
26. Taylor F. On the Art of Cutting Metals. Kindle Edition, 2017. 564 p.
27. Резание материалов. Режущий инструмент: учебник для среднего профессионального образования. В 2-х ч. Ч. 2 / С.Н. Григорьев [и др.]; под общ. ред. Н.А. Чемборисова. М.: Издательство Юрайт, 2023. 246 с.
28. Аршинов В.А., Алексеев Г.А. Резание металлов и режущий инструмент: учебник для машиностроит. техникумов. 2-е изд., доп. и перераб. М.: Машиностроение, 1968. 480 с.
29. Evaluation of tool life and workpiece surface roughness in turning of AISI D6 hardened steel using PCBN tools and minimum quantity of lubricant (MQL) applied at different directions / Bonfá M.C. et al. // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019, vol. 103, pp. 971-984. DOI: 10.1007/s00170-019-03619-z
30. Rashed R. The Development of Arabic Mathematics: Between Arithmetic and Algebra. Boston: Springer Science & Business Media, 1994. 600 p.
31. Riley K.F., Hobson M.P., Bence S.J. Mathematical methods for physics and engineering. New York: Cambridge University Press, 2006. 1363 p.
32. Davis P.J. Leonhard Euler's Integral: A Historical Profile of the Gamma Function // American Mathematical Monthly. 1959, vol. 66, no. 10, pp. 849-869. DOI: 10.2307/2309786
33. Pearson K. Historical note on the origin of the normal curve of errors // Biometrika. 1924, vol. 16, no. 3, pp. 402-404.
34. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 1 / под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1986. 656 с.
35. Fraleigh J.B. A First Course in Abstract Algebra, 7th ed. MA: Addison-Wesley, 2002. 544 p.
36. Mishina A.P. Higher Algebra: Linear Algebra, Polynomials, General Algebra. Oxford: Pergamon Press, 1965. 274 p.
37. Gorroochurn P. Some Laws and Problems of Classical Probability and How Cardano Anticipated Them // Chance. 2012, vol. 25, no. 4, pp. 13-20. DOI: 0.1080/09332480.2012.752279
38. Generalova A.A., Nikulin A.A. Increasing the Vehicle's Dynamic Performance by Developing a Continuously Variable Transmission // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2019, vol. 14, pp. 6866-6875. DOI: 10.3923/jeasci.2019.6866.6875
39. Zverovshchikov A.E., Generalova A.A., Nikulin A.A. Ensuring the performance characteristics of a friction V-belt variator // Journal of Physics: Conference Series. 2020, vol. 1679. DOI: 10.1088/1742-6596/1679/4/042079
40. Генералова А.А., Зверовщиков А.Е., Никулин А.А. Исследование влияния микропрофиля фрикционных элементов вариатора на коэффициент трения в зоне контакта и коэффициент полезного действия передачи // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. №3. С. 154-172. DOI: 10.21685/2072-3059-2023-3-12

References

1. Drozdov N.A. On the issue of machine vibrations during turning. *Stanki i instrument* [Machines and Tools]. 1937;(22): 1-25. (In Russ.)
2. Kashirin A.I. *Issledovanie vibratsii pri rezanii metallov* [Study on vibrations during metal cutting]. Moscow, Leningrad: Academy of Sciences of the USSR, 1944, 132 p. (In Russ.)
3. Sokolovsky A.P. *Zhestkost v tekhnologii mashinostroeniya* [Rigidity in mechanical engineering technology]. Moscow, Leningrad: Mashgiz in Leningrad, 1946, 207 p. (In Russ.)
4. Gugulothu S., Pasam V.K. Optimizing multi-response parameters in turning of AISI1040 steel using desirability approach. *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*. 2019;4(4):905-921. DOI: <https://dx.doi.org/10.33889/IJMEMS.2019.4.4-072>
5. Generalova A., Zverovshchikov A., Nikulin A. Surface waviness parameters of continuously variable transmission friction during turning. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2022.06.001>
6. Generalova A.A., Zverovshchikov A.E., Nikulin A.A. The influence of self-oscillations in the turning process on the formation of waviness of pulleys of automobile continuously variable transmissions. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhsky region. Tekhnicheskie nauki* [News of Higher Educational Institutions. Volga Region. Technical Sciences]. 2022;(4):108-121. (In Russ.) DOI:10.21685/2072-3059-2022-4-9
7. Lopovok T.S. *Volnistost poverkhnosti i ee izmerenie* [Surface waviness and its measurement]. Moscow: Publishing House of Standards, 1973, 184 p. (In Russ.)

8. Zharkov I.G. *Vibratsii pri obrabotke lezviynym instrumentom* [Vibrations when machining with a cutting tool]. Leningrad: Mashinostroenie. Leningrad Branch, 1986, 179 p. (In Russ.)
9. Kedrov S.S. *Kolebaniya metallorezhushchikh stankov* [Vibrations of metal-cutting machines]. Moscow: Mashinostroenie, 1978, 199 p. (In Russ.)
10. Martinova L.I., Grigoryev A.S., Sokolov S.V. Diagnostics and forecasting of cutting tool wear at CNC machines. *Autom. RemoteControl*. 2012;73(4):742-749.
11. Johanna M.F. et al. A tool condition monitoring system based on low-cost sensors and an IoT platform for rapid deployment. *Processes*. 2023;11(3):668. <https://doi.org/10.3390/pr11030668>
12. Bisu C.D. et al. Displacements analysis of self-excited vibrations in turning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2009;44(1-2):1-16.
13. Jozef Zajac et al. Prediction of cutting material durability by $T = f(v_c)$ dependence for turning processes. *Processes*. 2020;8:789. DOI: 10.3390/pr8070789
14. Zapciu M. et al. Dynamic characterization of machining systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2011;(57):73-83. DOI: 10.1007/s00170-011-3277-7
15. Molchanov A., Zaytzev A.N., Alexandrova Yu.P. Identification of the self-oscillating mode in metal-cutting machines in the production of agricultural machinery. VIII International Conference on Advanced Agritechnologies, Environmental Engineering and Sustainable Development. Krasnoyarsk, 2023, vol. 390. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339006009>
16. Altintas Y. *Manufacturing automation: Metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design*. New York, 2000, 286 p.
17. Yuqing Zhou et al. Synthetic minority oversampling enhanced FEM for tool wear condition monitoring. *Processes*. 2023;11(6):1785. DOI: 10.3390/pr11061785
18. Zhou Y.Q. et al. Tool wear condition monitoring based on a two-layer angle kernel extreme learning machine using sound sensor for milling process. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2022;33:247-258.
19. Korendyasev G. An approach to modeling self-oscillations during metal machining based on a finite-element model with small amount of computing resources. *Vibroengineering PROCEDIA*. 2020;32:6-12. DOI: 10.21595/vp.2020.21437
20. Omelyanov O. Prospects for the use of vibration during cutting material. *Vibrations in Engineering and Technology*. 2021;1:10. DOI: 10.37128/2306-8744-2021-1-10
21. Yilmaz B., Karabulut Ş., Cüllü A. A review of the chip breaking methods for continuous chips in turning. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020;49:50-69. DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.10.026
22. Leonov S.L., Zinoviev A.T. *Osnovy sozdaniya imitatsionnykh tekhnologiy pretsizionnogo formoobrazovaniya* [Fundamentals of creating simulation technologies of precision shaping]. Barnaul: Publishing House of Altai State Technical University, 2006, 198 p. (In Russ.)
23. Sokolova I.D., Beckel L.S., Pilipushko A.Y. Mathematical model of changing the combined cutting tool durability. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021;1047(1). DOI: 10.1088/1757-899X/1047/1/012013
24. Vasilkov D., Tarikov I.Y., Nikitin A.V. The dynamics of contact interaction during the cutting process. *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*. 2019;4(5):1218-1227. DOI: 10.33889/IJMEMS.2019.4.5-096
25. Orgiyan A. et al. Influence of cutting modes on wear resistance of cutters and accuracy of fine boring of steels. *Proceedings of Odessa Polytechnic University*. 2021;2(64):13-21.
26. Taylor F. *On the art of cutting metals*. Kindle Edition, 2017, 564 p.
27. Grigoriev S.N. et al. *Rezanie materialov. Rezhushchiy instrument: uchebnik dlya srednego professionalnogo obrazovaniya. V 2-kh ch. Ch. 2* [Cutting materials. Cutting tools: textbook for secondary vocational education. In 2 parts. Part 2]. Moscow: Publishing House of Yurait, 2023, 246 p. (In Russ.)
28. Arshinov V.A., Alekseev G.A. *Rezanie metallov i rezhushchiy instrument: uchebnik dlya mashinostroit. tekhnikumov* [Metal cutting and cutting tools: textbook for mechanical engineering colleges]. Moscow: Mashinostroenie, 1968, 480 p. (In Russ.)
29. Bonfã M.C. et al. Evaluation of tool life and workpiece surface roughness in turning of AISI D6 hardened steel using PCBN tools and minimum quantity of lubricant (MQL) applied at different directions. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019;103:971-984. DOI: 10.1007/s00170-019-03619-z
30. Rashed R. *The development of Arabic mathematics: Between arithmetic and algebra*. Boston: Springer Science & Business Media, 1994, 600 p.
31. Riley K.F., Hobson M.P., Bence S.J. *Mathematical methods for physics and engineering*. New York: Cambridge University Press, 2006, 1363 p.
32. Davis P.J. Leonhard Euler's integral: A historical profile of the gamma function. *American Mathematical Monthly*. 1959;66(10):849-869. DOI: 10.2307/2309786
33. Pearson K. Historical note on the origin of the normal curve of errors. *Biometrika*. 1924;16(3):402-404.
34. Kosilova A.K., Meshcheryakov R.K. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitelya. V 2-kh t. T. 1* [Handbook of a mechanical engineering technologist. In 2 volumes. Vol. 1]. Moscow: Mashinostroenie, 1986, 656 p. (In Russ.)
35. Fraleigh J.B. *A first course in abstract algebra*. MA: Addison-Wesley, 2002, 544 p.

36. Mishina A.P. Higher algebra: Linear algebra, polynomials, general algebra. Oxford: Pergamon Press, 1965, 274 p.
37. Gorroochurn P. Some laws and problems of classical probability and how Cardano anticipated them. *Chance*. 2012; 25(4):13-20. DOI: 0.1080/09332480.2012.752279
38. Generalova A.A., Nikulin A.A. Increasing the vehicle's dynamic performance by developing a continuously variable transmission. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2019;14:6866-6875. DOI: 10.3923/jeasci.2019.6866.6875
39. Zverovshchikov A.E., Generalova A.A., Nikulin A.A. Ensuring the performance characteristics of a friction V-belt variator. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1679. DOI: 10.1088/1742-6596/1679/4/042079
40. Generalova A.A., Zverovshchikov A.E., Nikulin A.A. Study on the effect of the microprofile of the friction elements of the continuously variable transmission on the coefficient of friction in the contact zone and efficiency of the transmission. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhsky region. Tekhnicheskie nauki* [News of Higher Educational Institutions. Volga Region. Technical Sciences]. 2023;(3):154-172. (In Russ.) DOI: 10.21685/2072-3059-2023-3-12

Поступила 17.10.2023; принята к публикации 25.12.2023; опубликована 28.03.2024
Submitted 17/10/2023; revised 25/12/2023; published 28/03/2024

Генералова Александра Александровна – кандидат технических наук, доцент,
Пензенский государственный университет, Пенза, Россия.
Email: generalova_aa@mail.ru. ORCID 0000-0002-3900-619X

Никулин Артём Анатольевич – инженер-исследователь,
Пензенский государственный университет, Пенза, Россия.
Email: artem.nikulin2003@yandex.ru. ORCID 0000-0003-1834-6053

Бычков Дмитрий Сергеевич – инженер-исследователь,
Пензенский государственный университет, Пенза, Россия.
Email: deciptikon@mail.ru. ORCID 0000-0003-1648-2289

Aleksandra A. Generalova – PhD (Eng.), Associate Professor,
Penza State University, Penza, Russia.
Email: generalova_aa@mail.ru. ORCID 0000-0002-3900-619X

Artem A. Nikulin – Researcher Engineer,
Penza State University, Penza, Russia.
Email: artem.nikulin2003@yandex.ru. ORCID 0000-0003-1834-6053

Dmitrii S. Bychkov – Researcher Engineer,
Penza State University, Penza, Russia.
Email: deciptikon@mail.ru. ORCID 0000-0003-1648-2289



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

УДК 621.923

DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-1-76-87

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ГЛУБИННОГО ШЛИФОВАНИЯ НА МОРФОЛОГИЮ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА

Носенко В.А.¹, Кременецкий Л.Л.¹, Коряжкин А.А.²

¹ Волжский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», Волжский, Россия

² ЗАО «Новые инструментальные решения», Рыбинск, Россия

Аннотация. Процесс глубинного шлифования сплавов на основе титана осложняется их высокой адгезионной активностью к абразивному материалу. Мерами, способствующими совершенствованию процесса глубинного шлифования в этих условиях, является подбор режимов резания и характеристик шлифовального круга. Дальнейшему развитию обработки методом глубинного шлифования труднообрабатываемых титановых сплавов способствует использование одного из последних средств контроля состояния шлифованной поверхности – сканирующего электронного микроскопа. Целью работы является исследование влияния скорости продольной подачи и твердости абразивного инструмента из карбида кремния зеленого на состояние обработанной поверхности сплава Ti6Al4V. Контроль состояния обработанной поверхности (морфология, химический состав) осуществляли на двухлучевом электронном микроскопе Versa 3D DualBeam. На обработанной поверхности установлено наличие налипов металла, царапин и борозд, оставленных вершинами зерен шлифовального круга. Установлены закономерности формирования обработанной поверхности по длине заготовки с учетом этапа глубинного шлифования. Этап постоянной длины дуги контакта характеризуется высокой интенсивностью адгезионно-когезионного взаимодействия абразивного материала и титанового сплава, которая снижается с переходом на этап выхода и уменьшением мгновенной режущей способности. С увеличением скорости продольной подачи v_s от 100 до 150 мм/мин интенсивность налипания обрабатываемого материала на вершины зерен шлифовального круга и переноса этого материала обратно на заготовку снижается. Установлено, что изменение характеристики шлифовального круга оказывает значимое влияние на состояние поверхности Ti6Al4V только при $v_s = 150$ мм/мин. Методом точечного элементного анализа доказан факт переноса абразивного материала (кристаллов карбида кремния) на титановый сплав при глубинном шлифовании.

Ключевые слова: глубинное шлифование, скорость продольной подачи, титановый сплав, карбид кремния, морфология, сканирующая электронная микроскопия

Исследование выполнено при финансовой поддержке ВолгГТУ в рамках научного проекта № 13/45-22.

© Носенко В.А., Кременецкий Л.Л., Коряжкин А.А., 2024

Для цитирования

Носенко В.А., Кременецкий Л.Л., Коряжкин А.А. Влияние условий глубинного шлифования на морфологию обработанной поверхности титанового сплава // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №1. С. 76-87. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-76-87>



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

THE INFLUENCE OF CREEP-FEED GRINDING CONDITIONS ON THE MORPHOLOGY OF THE MACHINED SURFACE OF A TITANIUM ALLOY

Nosenko V.A.¹, Kremenetskii L.L.¹, Koryazhkin A.A.²

¹ Volzhsky Polytechnic Institute (branch) of Volgograd State Technical University, Volzhsky, Russia

² CJSC New Tooling Solutions (NIR), Rybinsk, Russia

Abstract. The process of creep-feed grinding (CFG) of titanium-based alloys is complicated by their high adhesive activity to the abrasive material. Measures that contribute to improving the grinding process under these conditions are the selection of cutting modes and the grinding wheel characteristics. Further development of machining of hard-to-cut titanium alloys by CFG is facilitated by using one of the latest means of monitoring the condition of a machined surface, namely a scanning electron microscope. The research objective is to study the influence of longitudinal feed speed and hardness of an abrasive tool made of green silicon carbide on the condition of the machined surface of the Ti6Al4V alloy. The condition of the machined surface (morphology, a chemical composition) was monitored using a Versa 3D DualBeam electron microscope. Metal deposits, scratches and grooves left by peaks of the grinding wheel grains were detected on the machined surface. The authors established patterns of forming the machined surface along the length of the workpiece, taking into account a stage of CFG. The stage of constant length of the contact arc is characterized by a high intensity of the adhesive-cohesive interaction between the abrasive material and the titanium alloy, which decreases with the transition to the stage of removing the tool and a decrease in instantaneous cutting ability. When longitudinal feed speed v_s increases from 100 mm/min to 150 mm/min, the rate of adhesion of the machined material to peaks of the grinding wheel grains and the transfer of this material back to the workpiece decreases. It has been found that changes in the characteristics of the grinding wheel have a significant effect on the state of the Ti6Al4V surface at $v_s = 150$ mm/min only. Using the method of the spot elemental analysis, we proved the fact of transfer of the abrasive material (silicon carbide crystals) to the titanium alloy at CFG.

Keywords: creep-feed grinding, longitudinal feed speed, titanium alloy, silicon carbide, morphology, scanning electron microscopy

The research was funded by Volgograd State Technical University as part of research project No. 13/45-22.

For citation

Nosenko V.A., Kremenetskii L.L., Koryazhkin A.A. The Influence of Creep-Feed Grinding Conditions on the Morphology of the Machined Surface of a Titanium Alloy. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 1, pp. 76-87. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-76-87>

Введение

Глубинное шлифование (ГШ) широко применяется для обработки высокопрочных сталей, авиационных сплавов алюминия, жаропрочных конструкционных никелевых и титановых сплавов [1, 2]. С использованием последних достижений в области контроля состояния металлов ученые изучают вопросы формирования микротвердости и термических дефектов поверхностей деталей при ГШ [3, 4], причины образования остаточных напряжений [5], условия обеспечения требуемых параметров шероховатости обработанной поверхности [3, 6, 7]. С целью повышения эффективности процесса осуществляется разработка специальных СОТС [6] и шлифовальных кругов для ГШ [8].

Большое внимание уделяют переносу материалов при шлифовании, в частности шаржированию обработанной поверхности продуктами износа абразивного инструмента [9, 10], что особенно актуально при шлифовании сплавов на основе титана, обладающих высокой адгезионной активностью к абразивному материалу [11, 12]. Внедренные в поверхность материала абра-

зивные частицы рассматривают в качестве концентраторов напряжений, сокращающих срок эксплуатации изделий, особенно в условиях знакопеременных нагрузок [13]. С помощью электронной микроскопии и рентгеноспектрального анализа доказано, что процесс ГШ сопровождается переносом абразивного материала на поверхность титановых сплавов [14, 15].

Повышение производительности ГШ является одной из приоритетных задач машиностроения, в целях ее решения ученые осуществляют тщательный подбор элементов режима резания [16, 17]. Режим резания оказывает влияние на процесс шаржирования абразивным материалом. Установлено, что с увеличением скорости шлифования интенсивность переноса продуктов износа круга на обрабатываемую поверхность возрастает [15]. Важнейшим элементом режима резания и ключевым направлением повышения производительности ГШ является скорость продольной подачи [18]. Закономерности формирования морфологии обработанной поверхности в данных условиях до сих пор не изучены учеными России и мира. Выбор твердости абразивного инструмента оказывает существенное

влияние на процесс шлифования [19], потому требуемые микрорентгеноспектральные исследования необходимо провести с учетом влияния данной характеристики шлифовального круга.

Целью работы является исследование влияния скорости продольной подачи на состояние обработанной поверхности титанового сплава при глубинном шлифовании с учетом твердости абразивного инструмента.

Материалы и методы исследования

Глубинное шлифование титанового сплава Ti6Al4V осуществляли на станке SLS 434 (ООО «СП «Станковентд»). Размер обрабатываемой поверхности 40×16 мм. В качестве абразивного инструмента выбраны шлифовальные круги из карбида кремния зеленого: тип 1, размер 500×16×203 мм, характеристики 64CF80H12V и 64CF100I12V (далее круги 80H и 100I). Изготовитель шлифовальных кругов – ОАО «Волжский абразивный завод». Инструменты отличаются зернистостью шлифовального порошка и твердостью абразивного инструмента (F80H и F100I).

Режимы обработки: скорость шлифования $v = 20$ м/с; глубина шлифования $t = 2$ мм; скорость продольной подачи $v_s = 100-150$ мм/мин; подача правящего ролика $S_p = 1,2$ мкм/об. Охлаждение осуществляли синтетической водорастворимой смазочно-охлаждающей жидкостью Castrol Syntilo 81 E, концентрация препарата в воде – 5%, расход СОЖ – 200 л/мин. Станок подает СОЖ на гидроочистку абразивного инструмента, с двух сторон абразивного инструмента в зону шлифования и в зону контакта с правящим роликом.

Исследования морфологии и химического состава обработанной поверхности проводили на двухлучевом электронном микроскопе FEI Versa 3D DualBeam. Методика проведения исследований микрорельефа поверхности с помощью сканирующей электронной микроскопии изложена в работе [15].

Результаты исследования и их обсуждение

В соответствии с размерами заготовки, геометрическими параметрами абразивного инструмента, режимом обработки на заготовке вышлифовывали паз. Площадь номинального сечения паза 32 мм², длина паза 40 мм. Номинальный объем удаленного металла

1280 мм³. При расчете номинального значения приведенной режущей способности номинальный объем удаляемого металла приводили к единице ширины обработанной поверхности (высоте шлифовального круга). Приведенный номинальный объем удаляемого металла в данной серии экспериментов равен 80 мм².

Процесс ГШ в рассматриваемых условиях состоит из трех этапов: врезание, постоянная длина дуги контакта (ПДДК) и выход (рис. 1). Расчет номинальной мгновенной режущей способности, приведенной к 1 мм ширины обрабатываемой поверхности q , выполнен по формулам, представленным в работе [20].

На этапе врезания q растет в связи с ростом фактической глубины шлифования. Формирование обработанной поверхности начинается с этапа ПДДК, поэтому на графике этап врезания показан в отрицательной области оси абсцисс (рис. 1, а). На этапе ПДДК номинальный объем металла, удаляемый за бесконечно малый временной промежуток, будет постоянным и равным максимальному значению за весь период шлифования. С переходом на этап выхода q снижается до нулевого значения. Закономерность изменения номинального значения q на этапе выхода определяется скоростью продольной подачи и фактической глубиной шлифования [20]. Протяженность этапа врезания и выхода 30,92 мм, протяженность этапа ПДДК – 9,08 мм (см. рис. 1, а). На этапе врезания номинальное значение q возрастает от нуля до максимального значения: $q = 3,33$ мм²/с при $v_s = 100$ мм/мин; $q = 5,0$ мм²/с при $v_s = 150$ мм/мин. С увеличением v_s в 1,5 раза q на этапе ПДДК возрастает в таком же соотношении.

Временная продолжительность этапов определяется скоростью продольной подачи (рис. 1, б). При шлифовании на скорости $v_s = 100$ мм/мин этапы врезания и выхода выполнены за 18,55 с, этап ПДДК – за 5,45 с. На скорости $v_s = 150$ мм/мин временная продолжительность этапов снижается пропорционально увеличению скорости продольной подачи в 1,5 раза: этапы врезания и выхода – до 12,37 с, этап ПДДК – до 3,63 с. Диаметр шлифовальных кругов на анализируемой серии испытаний составлял около 480 мм. Для обеспечения скорости шлифования $v = 20$ м/с скорость вращения абразивных инструментов 13,27 об/с.

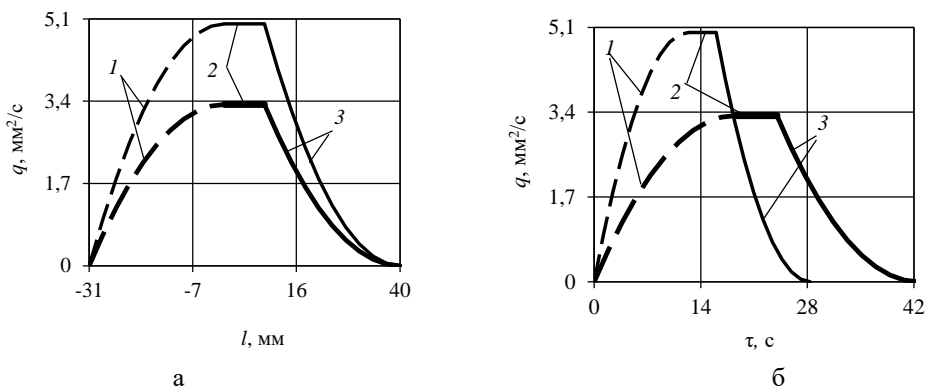


Рис. 1. Изменение q на этапах ГШ: 1 – врезание; 2 – ПДДК; 3 – выход; — 100 мм/мин; - 150 мм/мин
 Fig. 1. Changing q at the stages of CFG: 1 is a stage of incision; 2 is a stage of constant length of the contact arc; 3 is a stage of removing the tool; — 100 mm/min; - 150 mm/min

Требования к зерновому составу шлифовальных порошков F80 и F100 приведены в табл. 1. Кроме зернового состава шлифовальных порошков F80 и F100 для сравнения показан зерновой состав шлифовального порошка зернистостью F90. В нижней строке представлены отношения номинальных размеров ячеек проходных сит W . Во фракциях $W_1 - W_4$ отношение $W_{180} / W_{100} \approx 1,4$. Приблизительно в таком же соотношении должны находиться размеры зерен шлифовальных порошков зернистостью F80 и F100.

Радиальный износ шлифовальных кругов по длине обработанной поверхности, определяемый режимом правки и скоростью продольной подачи, показан в табл. 2.

Фотографии микрорельефа поверхности титанового сплава Ti6Al4V после шлифования кругом 80Н на различных скоростях продольной подачи представлены на рис. 2 и 3. Рис. 2, а, б и 3, а, б характеризуют состояния обработанной поверхности соответственно в начале и в конце этапа ПДДК, рис. 2, в-д и 3, в-д – в начале, в середине и в конце этапа выхода.

Фотографии микрорельефа свидетельствуют о высокой активности адгезионно-когезионного процесса взаимодействия титанового сплава с абразивным инструментом. В связи с высокой адгезионной активностью титана металл налипают на вершины зерен шлифовального круга. На следующих оборотах при контакте с обрабатываемой поверхностью металл, налип-

ший на вершины зерен, переносится на обрабатываемую поверхность. Фрагменты таких налипов просматриваются в левой части фотографии, сделанной в начале этапа ПДДК при шлифовании кругом 80Н со скоростью продольной подачи 100 мм/мин. Обновлению рабочей поверхности круга при ГШ способствует постоянная правка алмазным роликом – в данном случае налипший на вершины зерен круга металл удаляется частично и переносится на шлифованную поверхность, что обусловлено недостаточной скоростью подачи алмазного ролика (см. рис. 2, а).

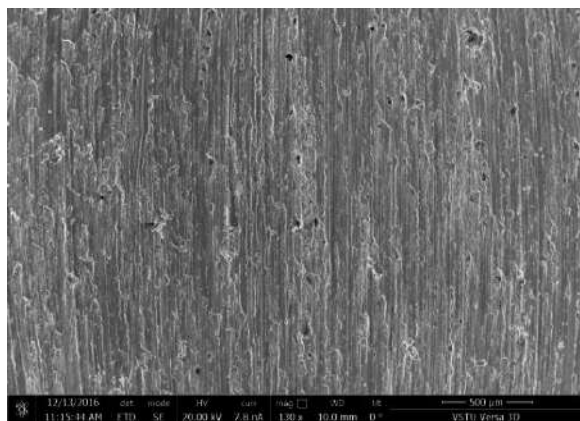
Как было отмечено ранее (см. рис. 1), на этапе врезания q возрастает от нуля до максимального значения. С увеличением q возрастает сила резания [21] и нагрузка на вершины режущих зерен. При шлифовании мягким абразивным инструментом 80Н с увеличением нагрузки на вершину зерна возрастает вероятность вырывания зерна из связки круга. На этапе ПДДК сила резания максимальна. В этот период шлифования максимальна и вероятность вырывания зерна с рабочей поверхности абразивного инструмента. Об этом свидетельствует снижение силы резания в данный период шлифования [22]. Скорость радиального износа абразивного инструмента приближается к скорости радиальной подачи алмазного ролика или даже превосходит её. В связи с этим на этапе ПДДК наблюдается перенос налипшего металла с вершины зерна на обработанную поверхность.

Таблица 1. Зерновой состав шлифовальных порошков зернистостью F80-F100 (ГОСТ Р 52381-2005)
Table 1. Grain composition of grinding powders with a grain size of F80-F100 (GOST R 52381-2005)

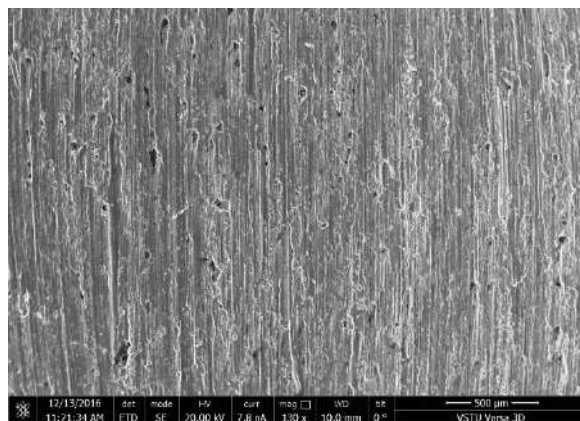
F	W_1 , мкм	Q_1 , %	W_2 , мкм	Q_2 , %	W_3 , мкм	Q_3 , %	W_4 , мкм	Q_3+Q_4 , %	W_5 , мкм	$Q_3 + Q_4 +$ $+ Q_5$, %	ΔQ , %
F80	300	–	212	25	180	40	150	65	125	–	3
F90	250	–	180	20	150	40	125	65	106	–	3
F100	212	–	150	20	125	40	106	65	75	–	3
W_{180} / W_{100}	1,42	–	1,41	–	1,44	–	1,42	–	1,66	–	–

Таблица 2. Радиальный износ шлифовальных кругов
Table 2. Radial wear of grinding wheels

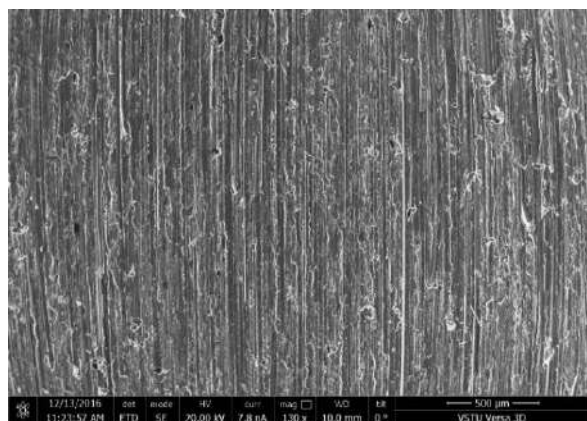
Длина пути шлифования	h , мкм	
	$v_s = 100$ мм/мин	$v_s = 150$ мм/мин
$l = 1$ мм	4,78	3,18
$l = 9$ мм	42,99	28,66
$l = 14$ мм	66,88	44,59
$l = 30$ мм	143,31	95,54
$l = 38$ мм	181,53	121,02
Этап ПДДК + этап выхода	191,08	127,39
Этап врезания + этап ПДДК + этап выхода	338,79	225,86



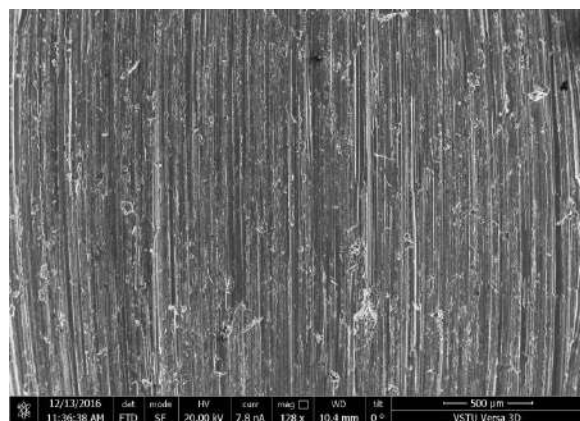
а



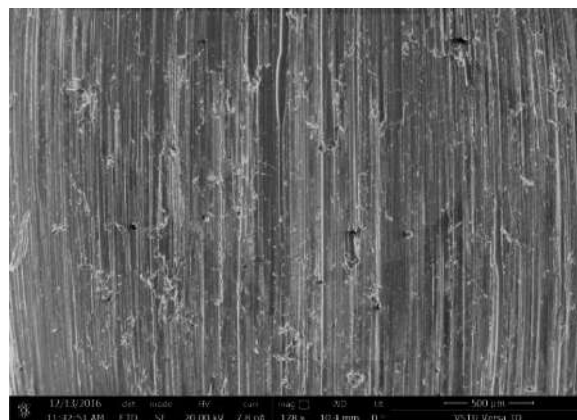
б



в



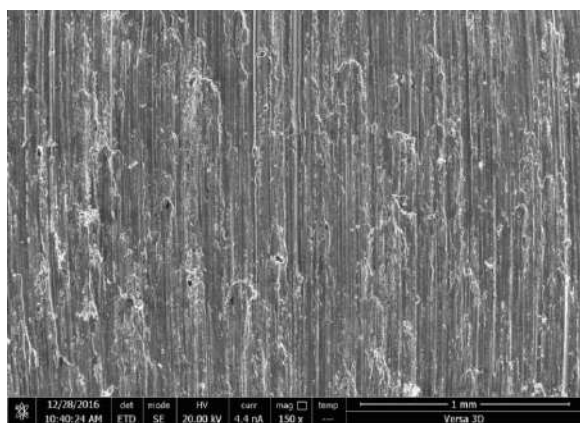
г



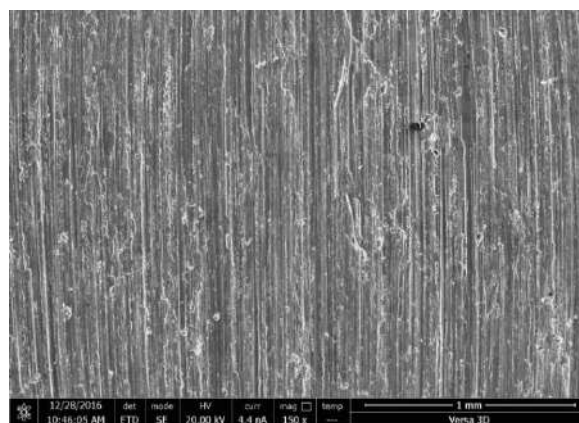
д

Рис. 2. Микрорельеф поверхности при шлифовании кругом 80Н, $v_s = 100$ мм/мин: а – $l = 1$ мм; б – $l = 9$ мм; в – $l = 14$ мм; г – $l = 30$ мм; д – $l = 38$ мм

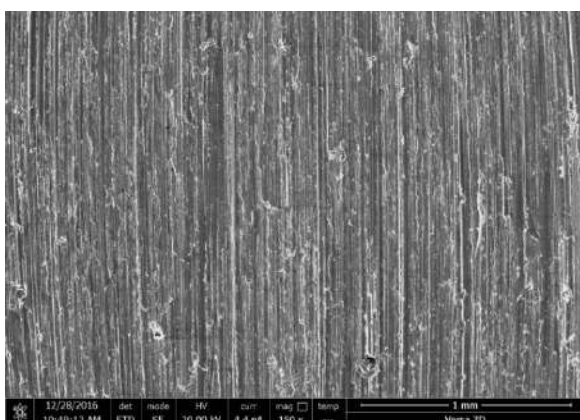
Fig. 2. Surface microrelief when grinding with 80H wheel, $v_s = 100$ mm/min: а is $l = 1$ mm; б is $l = 9$ mm; в is $l = 14$ mm; г is $l = 30$ mm; д is $l = 38$ mm



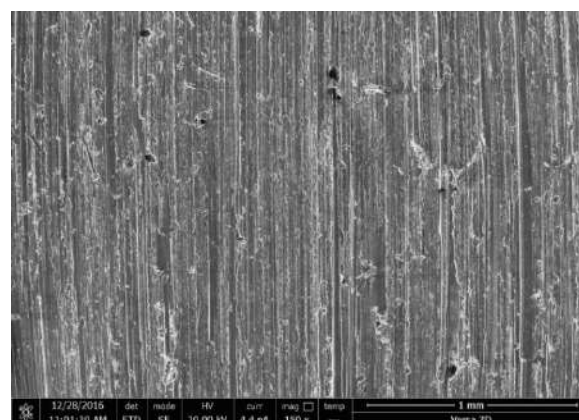
а



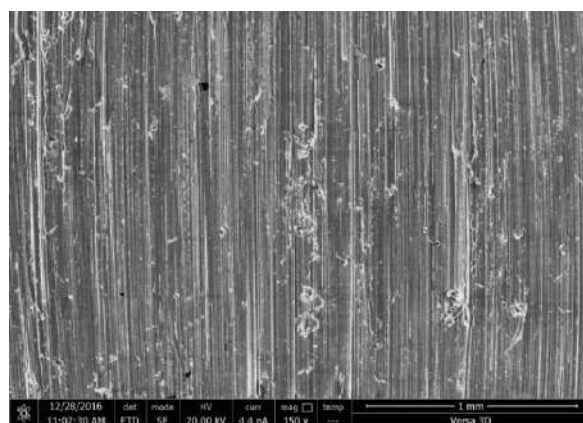
б



в



г



д

Рис. 3. Микрорельеф поверхности при шлифовании кругом 80Н, $v_s = 150$ мм/мин: а – $l = 1$ мм; б – $l = 9$ мм; в – $l = 14$ мм; г – $l = 30$ мм; д – $l = 38$ мм

Fig. 3. Surface microrelief when grinding with 80H wheel, $v_s = 150$ mm/min: а is $l = 1$ mm; б is $l = 9$ mm; в is $l = 14$ mm; г is $l = 30$ mm; д is $l = 38$ mm

К концу этапа ПДДК (см. **рис. 2, б**) интенсивность адгезионно-когезионного процесса изменяется: снижается количество налипов, перенесенных с вершин зерен на обрабатываемый титановый сплав и размазанных по его поверхности; появляются более чистые царапины, оставленные вершинами зерен абразивного инструмента. Тем не менее при шлифовании кругом 80Н состояние микрорельефа титанового сплава существенно не изменяется за этап ПДДК.

Морфология обработанной поверхности изменяется значительно с переходом на этап выхода (см. **рис. 2, в**). Ранее при ГШ было установлено, что для этапа выхода характерно снижение силы резания, что обусловлено уменьшением q на данном этапе [23]. В рассматриваемых в работе условиях на этапе выхода, на расстоянии около 14 мм от края образца, q по сравнению с этапом ПДДК снижается в 1,6 раза, что вместе со снижением составляющих силы резания способствует уменьшению интенсивности адгезионного взаимодействия абразивного инструмента с обрабатываемым материалом. На шлифованной поверхности хорошо различимы отдельные царапины, сформированные зернами шлифовального круга, свободными от налипшего металла. Можно предположить, что с уменьшением объема удаляемого металла нагрузки на вершины зерен будут снижаться. В результате большее количество вершин зерен, покрытых налипшим металлом, вступит в контакт с алмазным роликом, и возрастет число относительно чистых вершин зерен, взаимодействующих с обрабатываемой поверхностью (см. **рис. 2, в**). На длине обработанной поверхности около 22 мм q снижается по сравнению с этапом ПДДК в 2,8 раза. Соответственно, возрастает количество вершин зерен, прошедших процедуру принудительного затачивания алмазным роликом. В этих условиях морфология обработанной поверхности продолжает улучшаться. Количество налипов металла, перенесенных на шлифованную поверхность, снижается, но заметно увеличивается количество продуктов износа абразивного инструмента, перенесенных на обработанную поверхность (см. **рис. 2, г**). На длине обработанной поверхности около 38 мм радиальный износ шлифовального круга составляет 181,5 мкм (см. **табл. 2**), количество продуктов износа на обработанной поверхности продолжает увеличиваться, что непосредственно связано с возросшим влиянием правки на процесс ГШ (см. **рис. 2, д**).

При $v_s = 150$ мм/мин этап ПДДК также характеризуется высокой интенсивностью адгезионно-когезионного взаимодействия с абразивным инструментом 80Н (см. **рис. 3, а**). Отличительной особенностью шлифования на данной скорости продольной подачи является увеличение q в 1,5 раза (см. **рис. 1**). Но при этом в 1,5 раза снижена радиальная подача алмазного ролика. Интенсивность износа абразивного инструмента в результате самозатачивания будет возрастать, так как возросла q . В начале этапа ПДДК при скорости $v_s = 150$ мм/мин на поверхности присутствуют ярко выраженные налипы металла (см. **рис. 3, а**). При

$v_s = 100$ мм/мин в начале этапа ПДДК на поверхности явно выраженных неразмазанных налипов металла нет (см. **рис. 2, а**). В конце этапа ПДДК при скорости продольной подачи $v_s = 150$ мм/мин царапины, оставленные вершинами зерен на поверхности титанового сплава, более ярко выражены, чем при $v_s = 100$ мм/мин, что связано с увеличением объема удаляемого металла (см. **рис. 3, б**).

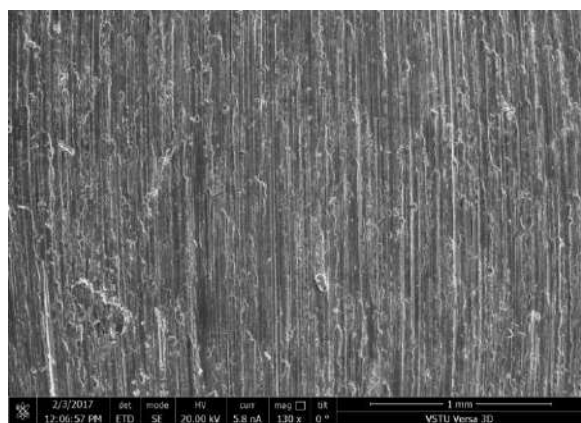
С увеличением v_s в 1,5 раза процесс формообразования микрорельефа в начале этапа выхода не изменяется значительно. Царапин, оставленных на обработанной поверхности вершинами зерен, достаточно много и в том и другом случае (см. **рис. 2, в, 3, в**). На скорости подачи стола $v_s = 150$ мм/мин края царапин более четкие. Создается впечатление, что царапины более глубокие, чем на скорости $v_s = 100$ мм/мин.

В середине этапа выхода встречаются участки с большим количеством посторонних объектов, шаржированных в обработанную поверхность (см. **рис. 3, г**). Стоит отметить, что наличие данных объектов установлено также на этапе ПДДК. При $v_s = 100$ мм/мин поверхность более чистая – посторонние объекты на ней присутствуют в меньшем количестве. Внешний вид данных посторонних объектов позволяет предположить, что они являются продуктами износа шлифовального круга.

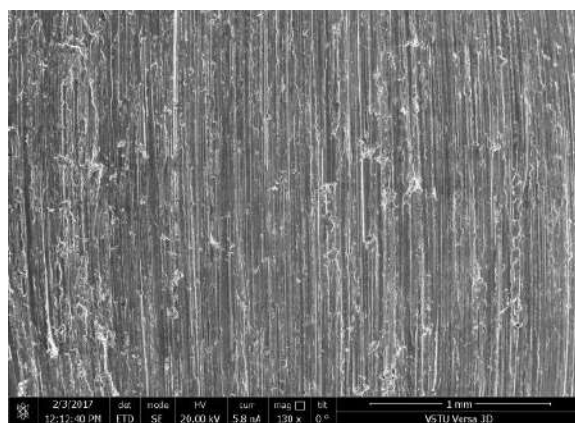
В конце этапа выхода на скорости продольной подачи $v_s = 150$ мм/мин при шлифовании кругом 80Н морфология обработанной поверхности практически не отличается от морфологии обработанной поверхности на скорости подачи $v_s = 100$ мм/мин (см. **рис. 2, д, 3, д**).

Электронные фотографии микрорельефа поверхности при ГШ кругом 100I и $v_s = 100$ мм/мин подтверждают ранее установленные закономерности (**рис. 4**). Образование налипов металла на обрабатываемой поверхности при шлифовании кругом 100I, так же как и кругом 80Н, происходит в основном на этапе ПДДК. На этапе выхода обрабатываемая поверхность постепенно становится более однородной и чистой от посторонних объектов. Использование круга большей твердости и меньшей зернистости при $v_s = 100$ мм/мин не привело к значимым изменениям морфологии поверхности на этапе ПДДК, в начале и в середине этапа выхода. Поверхность, сформированная кругом 100I в конце этапа выхода, более чистая от включений кристаллов карбида кремния, чем при шлифовании кругом 80Н (**рис. 4, д**).

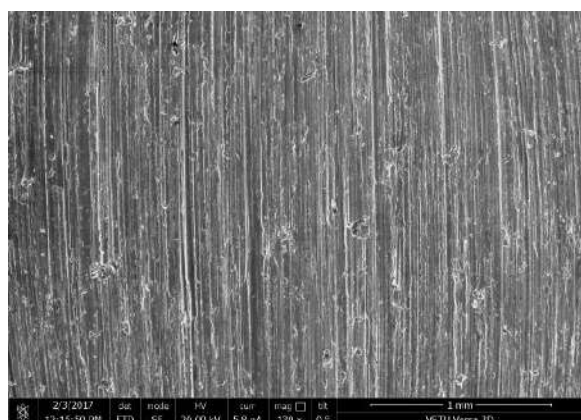
Скорость продольной подачи оказывает влияние на морфологию поверхности на этапе ПДДК при шлифовании кругом 100I. В начале этапа ПДДК при скорости $v_s = 150$ мм/мин на поверхности присутствуют ярко выраженные налипы металла (**рис. 5, а**). При $v_s = 100$ мм/мин в начале этапа ПДДК явно выраженных налипов металла меньше (**рис. 4, а**). Далее на этапе ПДДК при шлифовании кругом 100I на скорости $v_s = 150$ мм/мин поверхность становится более чистой от налипов металла, присутствует большое количество царапин, сформированных зернами круга (**рис. 5, б**). При скорости $v_s = 100$ мм/мин на аналогичном участке поверхности царапин меньше (**рис. 4, б**).



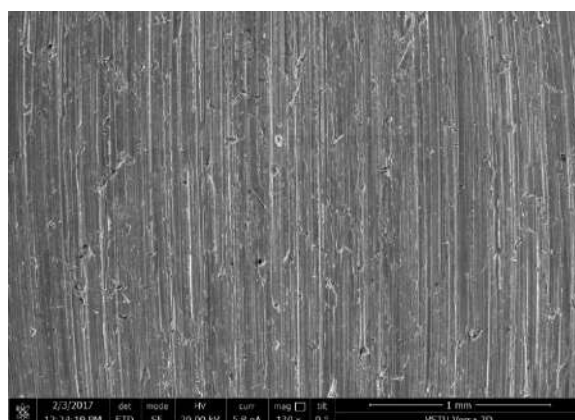
а



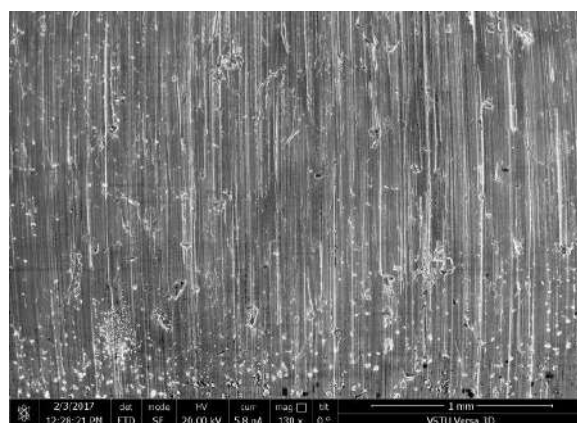
б



в



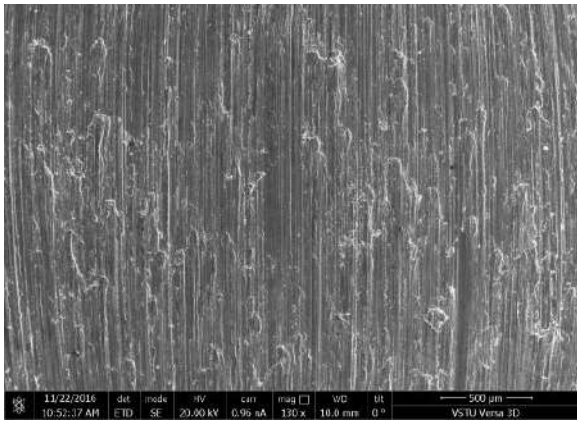
г



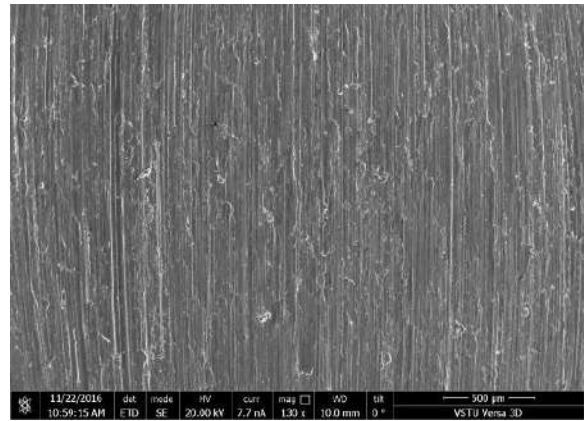
д

Рис. 4. Микрорельеф поверхности при шлифовании кругом 100I, $v_s = 100$ мм/мин: а – $l = 1$ мм; б – $l = 9$ мм; в – $l = 14$ мм; г – $l = 30$ мм; д – $l = 38$ мм

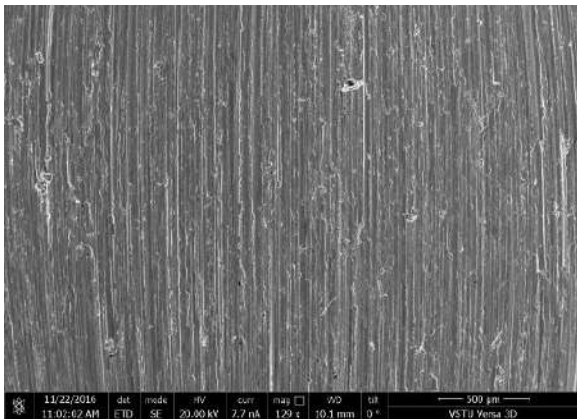
Fig. 4. Surface microrelief when grinding with 100I wheel, $v_s = 100$ mm/min: а is $l = 1$ mm; б is $l = 9$ mm; в is $l = 14$ mm; г is $l = 30$ mm; д is $l = 38$ mm



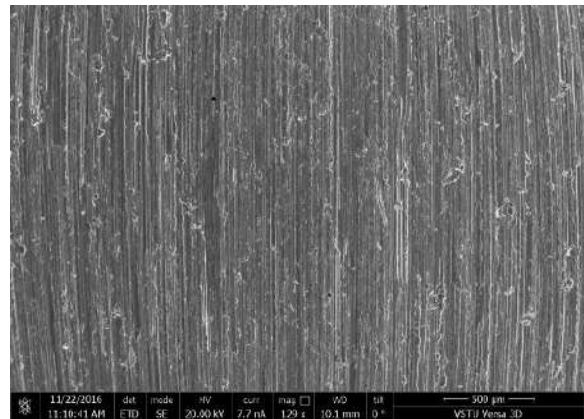
а



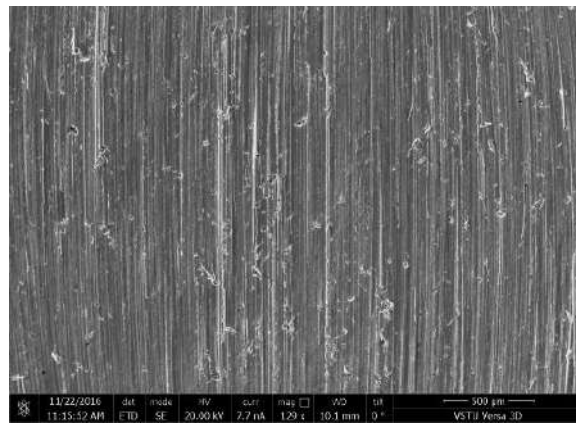
б



в



г



д

Рис. 5. Микрорельеф поверхности при шлифовании кругом 100I, $v_s = 150$ мм/мин: а – $l = 1$ мм; б – $l = 9$ мм; в – $l = 14$ мм; г – $l = 30$ мм; д – $l = 38$ мм

Fig. 5. Surface microrelief when grinding with 100I wheel, $v_s = 150$ mm/min: а is $l = 1$ mm; б is $l = 9$ mm; в is $l = 14$ mm; г is $l = 30$ mm; д is $l = 38$ mm

На скорости продольной подачи $v_s = 100$ мм/мин при шлифовании кругом 100I по сравнению с кругом 80H характеристика инструмента оказывает влияние на микрорельеф только в конце этапа выхода. На скорости $v_s = 150$ мм/мин шлифование более твердым, с меньшей зернистостью инструментом оказывает значимое влияние на состояние поверхности по всей длине образца. С изменением характеристики круга на этапе ПДДК поверхность становится более чистой, количество налипшего и размазанного металла на шлифованной поверхности меньше. Визуальная оценка также свидетельствует о меньшем количестве посторонних объектов, внедренных в поверхность титанового сплава (см. рис. 3, а, б, 5, а, б). Эта закономерность сохраняется и на этапе выхода, когда морфология поверхности продолжает улучшаться, что является свидетельством снижения адгезионной активности (см. рис. 3, в-д, 5, в-д). В связи с уменьшением объема удаляемого металла, соответственно, снижением износа абразивного инструмента в результате контакта вершин зерен с обрабатываемым металлом алмазный ролик начинает контактировать с большим количеством вершин зерен на рабочей поверхности шлифовального круга, очищая их от налипшего металла.

При увеличении $\times 4000$ получена фотография постороннего объекта, шаржированного в поверхность титанового сплава (рис. 6, а). Внешний вид объекта позволил предположить, что он является кристаллом карбида кремния. Методом точечного элементного анализа была произведена оценка объекта. Элементный анализ проводили в двух точках – на объекте и на относительно чистом участке поверхности (рис. 6, б). Концентрации кремния и углерода в точке 1 превышают концентрации данных элементов в точке 2: в точке 1 концентрация кремния достигает 80,24 мас.%, концентрация углерода составляет 16,6 мас.%; в точке 2 кон-

центрации кремния и углерода составляют 0,23 и 1,55 мас.% соответственно. Содержание титана по точкам 1 и 2 составляет 2,24 и 83,39 мас.% соответственно.

Стандарт SAE AMS4928U-2017 регламентирует состав сплава Ti6Al4V: содержание кремния не должно превышать 0,1 мас.%, содержание углерода не должно превышать 0,08 мас.%. Результаты точечного элементного анализа позволяют определить посторонний объект как кристалл карбида кремния.

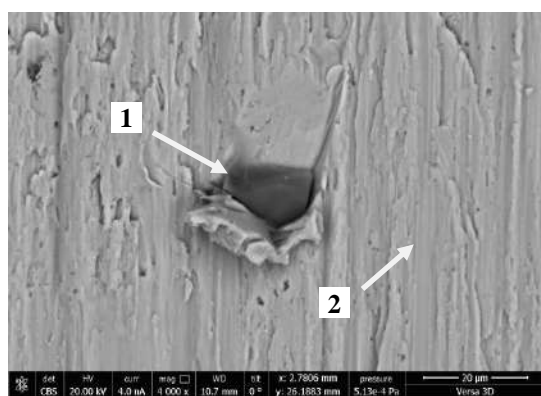
Заключение

Анализ микрорельефа обработанной поверхности показал, что она в значительной степени покрыта налипшим и размазанным металлом. Установлено, что микрорельеф обработанной поверхности изменяется по длине шлифования. С переходом от этапа ПДДК к этапу выхода интенсивность адгезионного взаимодействия инструмента и обрабатываемого титанового сплава существенно снижается.

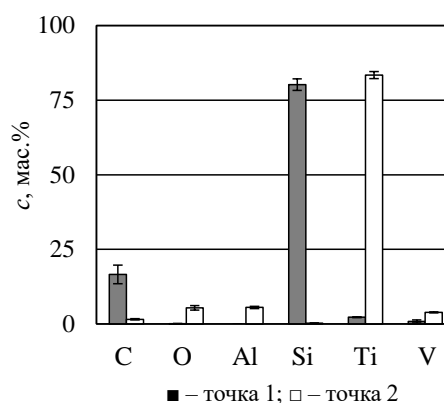
При шлифовании кругом 80H с увеличением скорости продольной подачи v_s в 1,5 раза на этапе ПДДК суммарная площадь участков обработанной поверхности, покрытых размазанным металлом, снижается. Установлено наличие отдельных ярко выраженных налипов и царапин, оставленных вершинами зерен. На этапе выхода при шлифовании кругом 80H и $v_s = 100-150$ мм/мин морфологии обработанных поверхностей принципиальных различий не имеют.

Переход от круга 80H к кругу 100I при $v_s = 100$ мм/мин оказывает влияние на морфологию обработанной поверхности титанового сплава только в конце этапа выхода. Изменение характеристики круга при $v_s = 150$ мм/мин приводит к снижению адгезионной активности в паре абразив-металл.

Методом точечного элементного анализа доказан перенос кристаллов карбида кремния на обрабатываемую поверхность титанового сплава при ГШ.



а



б

Рис. 6. Микрорельеф поверхности при увеличении $\times 4000$ (а), результаты точечного элементного анализа (б)
Fig. 6. Surface microrelief, $\times 4000$ magnification (a); spot elemental analysis (б)

Список источников

- Klocke F., Soo S.L., Karpuschewski B. Abrasive machining of advanced aerospace alloys and composites // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2015, vol. 64, iss. 2, pp. 581-604.
- Старков В.К. Эффективность инструмента из кубического нитрида бора при профильном глубинном шлифовании деталей из жаропрочных никелевых сплавов // *Вестник машиностроения*. 2023. №6. С. 520-528.
- Gostimirovic M., Sekulic M., Rodic D. Surface integrity study of creep-feed grinding // *Applied Engineering Letters*. 2020, vol. 5, iss. 3, pp. 94-103.
- Song Y., Shi K., He Z. Investigation of grindability and surface integrity in creep feed grinding of GH738 alloy using different grinding wheels // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022, vol. 123, iss. 3, pp. 4153-4169.
- On the residual stresses of turbine blade root of γ -TiAl intermetallic alloys induced by non-steady-state creep feed profile grinding / T. Chen, Q. Miao, M. Xiong, X. Xi, B. Zhao, C. Pu, W. Ding // *Journal of Manufacturing Processes*. 2022, vol. 82, iss. 2, pp. 800-817.
- Inverse approach to derive the distribution of convection heat transfer coefficient of grinding fluid within grinding zone for deep grinding of nickel based super alloy / T. Jin, X. Ma, H. Hu, M. Qu, Z. Shang // *Journal of Mechanical Engineering*. 2022, vol. 58, iss. 15, pp. 55-62.
- Creep feed grinding of burn-resistant titanium (BuR-Ti) using superabrasive wheels / S.L. Soo, R. Hood, M. Lannette, D.K. Aspinwall, W.E. Voice // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2011, vol. 53, iss. 9, pp. 1019-1026.
- Jackson M.J., Ruxton V. Creep-feed grinding wheel development for safely grinding aerospace alloys // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2021, vol. 30, iss. 4, pp. 2220-2228.
- Comparative investigation on wear behavior of brown alumina and microcrystalline alumina abrasive wheels during creep feed grinding of different nickel-based superalloys / M. Qing, D. Wenfeng, G. Yulong, X. Jiuhua // *Wear*. 2019, vol. 426, pp. 1624-1634.
- Wang R.X., Zhou K., Yang J.Y. Effects of abrasive material and hardness of grinding wheel on rail grinding behaviors // *Wear*. 2020, vol. 454, 203332.
- Xipeng X., Yiqing Y. Mechanisms of abrasive wear in the grinding of titanium (TC4) and nickel (K417) alloys // *Wear*. 2003, vol. 255, no. 7-12, pp. 1421-1426.
- Mello Antonio Vitor, Da Silva Rosemar, Machado Alisson, Gelamo Rogério, Diniz Anselmo, Oliveira Rodolfo. Surface grinding of Ti-6Al-4V alloy with SiC abrasive wheel at various cutting conditions // *Procedia Manufacturing*. 2017, vol. 10, pp. 590-600.
- Планковский С.И., Головин И.И., Сиренко Ф.Ф. Анализ существующих методов очистки поверхности лопаток турбин в газотурбинных двигателях // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2013. №6. С. 8-14.
- Nosenko S.V., Nosenko V.A., Koryazhkin A.A. The effect of the operating speed and wheel characteristics on the surface quality at creep-feed grinding titanium alloys // *Solid State Phenomena*. 2018, vol. 284, pp. 369-374.
- Влияние скорости глубинного шлифования на морфологию и химический состав поверхности титанового сплава / С.В. Носенко, В.А. Носенко, А.А. Коряжкин и др. // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2018. №3. С. 62-72.
- Qing M., Hao N.L., Ding W. On the temperature field in the creep feed grinding of turbine blade root: simulation and experiments // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020, vol. 147, 118957.
- Скрябин В.А., Ленин А.Д., Демидов Е.А. Особенности глубинного шлифования деталей турбокомпрессоров // *Технология металлов*. 2019. №9. С. 27-31.
- Волков Д.И., Полуглазкова Н.В. Исследования алгоритмов управления обработкой деталей ГТД при глубинном шлифовании // *СТИН*. 2019. №2. С. 20-24.
- Старков В.К. Шлифование высокопористыми кругами. М.: Машиностроение, 2007. 688 с.
- Носенко С.В., Носенко В.А., Зотова С.А. Этапы глубинного шлифования. Волжский: ВПИ (филиал) ФГБОУ ВО «ВолГТУ», 2021. 166 с.
- Носенко В.А., Носенко С.В. Попутное и встречное глубинное шлифование титанового сплава с непрерывной правкой круга // *Вестник машиностроения*. 2010. №11. С. 57-61.
- Носенко В.А., Авилов А.В. Закономерности изменения силы плоского глубинного шлифования // *Справочник. Инженерный журнал*. 2009. №7. С. 10-19.
- Носенко В.А., Носенко С.В. Математические модели наработки и режущей способности для различных этапов плоского глубинного шлифования горизонтальных поверхностей кругом прямого профиля // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2010. №4. С. 92-98.

References

- Klocke F., Soo S.L., Karpuschewski B. Abrasive machining of advanced aerospace alloys and composites. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2015;64(2):581-604.
- Starkov V.K. Efficiency of cubic boron nitride tools in profile creep-feed grinding of parts made of heat-resistant nickel alloys. *Vestnik mashinostroeniya* [Mechanical Engineering Bulletin]. 2023;(6):520-528. (In Russ.)
- Gostimirovic M., Sekulic M., Rodic D. Surface integrity study of creep-feed grinding. *Applied Engineering Letters*. 2020;5(3):94-103.
- Song Y., Shi K., He Z. Investigation of grindability and surface integrity in creep feed grinding of GH738 alloy using different grinding wheels. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022;123(3):4153-4169.
- Chen T., Miao Q., Xiong M., Xi X., Zhao B., Pu C., Ding W. On the residual stresses of turbine blade root of γ -TiAl intermetallic alloys induced by non-steady-state creep feed profile grinding. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022;82(2):800-817.
- Jin T., Ma X., Hu H., Qu M., Shang Z. Inverse approach to derive the distribution of convection heat transfer coefficient of grinding fluid within grinding zone for deep

- grinding of nickel based super alloy. *Journal of Mechanical Engineering*. 2022;58(15):55-62.
7. Soo S.L., Hood R., Lannette M., Aspinwall D.K., Voice W.E. Creep feed grinding of burn-resistant titanium (BuRTi) using superabrasive wheels. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2011;53(9):1019-1026.
 8. Jackson M.J., Ruxton V. Creep-feed grinding wheel development for safely grinding aerospace alloys. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2021;30(4):2220-2228.
 9. Qing M., Wenfeng D., Yulong G., Jiuhua X. Comparative investigation on wear behavior of brown alumina and microcrystalline alumina abrasive wheels during creep feed grinding of different nickel-based superalloys. *Wear*. 2019;426:1624-1634.
 10. Wang R.X., Zhou K., Yang J.Y. Effects of abrasive material and hardness of grinding wheel on rail grinding behaviors. *Wear*. 2020;454:Article ID 203332.
 11. Xipeng X., Yiqing Y. Mechanisms of abrasive wear in the grinding of titanium (TC4) and nickel (K417) alloys. *Wear*. 2003;255(7-12):1421-1426.
 12. Mello Antonio Vitor, Da Silva Rosemar, Machado Alisson, Gelamo Rogério, Diniz Anselmo, Oliveira Rodolfo. Surface grinding of Ti-6Al-4V alloy with SiC abrasive wheel at various cutting conditions. *Procedia Manufacturing*. 2017;10:590-600.
 13. Plankovskiy S.I., Golovin I.I., Sirenko F.F. Analysis of existing methods for cleaning the surface of turbine blades in gas turbine engines. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya* [Aerospace Engineering and Technology]. 2013;(6):8-14. (In Russ.)
 14. Nosenko S.V., Nosenko V.A., Koryazhkin A.A. The effect of the operating speed and wheel characteristics on the surface quality at creep-feed grinding titanium alloys. *Solid State Phenomena*. 2018;284:369-374.
 15. Nosenko S.V., Nosenko V.A., Koryazhkin A.A., Kremenetskii L.L. The effect of the creep-feed grinding speed on morphology and chemical composition of the titanium alloy surface. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering]. 2018;(3):62-72. (In Russ.)
 16. Qing M., Hao N.L., Ding W. On the temperature field in the creep feed grinding of turbine blade root: simulation and experiments. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020;147:Article ID 118957.
 17. Skryabin V.A., Lenin A.D., Demidov E.A. Features of creep-feed grinding of turbocharger parts. *Tekhnologia metallov* [Metal Technology]. 2019;(9):27-31. (In Russ.)
 18. Volkov D.I., Poluglazkova N.V. Studies on algorithms for controlling the machining of gas turbine engine parts at creep-feed grinding. *STIN* [Machines and Tools]. 2019;(2):20-24. (In Russ.)
 19. Starkov V.K. *Shlifovanie vysokoporistymi krugami* [Grinding with highly porous wheels]. Moscow: Mashinostroenie, 2007, 688 p. (In Russ.)
 20. Nosenko S.V., Nosenko V.A., Zotova S.A. *Etapy glubinnogo shlifovaniya* [Stages of creep-feed grinding]. Volgograd: Volgzhsky Polytechnic Institute (branch) of Volgograd State Technical University, 2021, 166 p. (In Russ.)
 21. Nosenko V.A., Nosenko S.V. Up and down deep grinding of the titanium alloy with continuous wheel dressing. *Vestnik mashinostroeniya* [Mechanical Engineering Bulletin]. 2010;(11):57-61. (In Russ.)
 22. Nosenko V.A., Avilov A.V. Patterns of force changing at flat creep-feed grinding. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal* [Handbook. An Engineering Journal]. 2009;(7):10-19. (In Russ.)
 23. Nosenko V.A., Nosenko S.V. Mathematical models of operating time and cutting capacity for various stages of flat creep-feed grinding of horizontal surface with straight wheels. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Journal of Machinery Manufacturing and Reliability]. 2010;(4):92-98. (In Russ.)

Поступила 13.12.2023; принята к публикации 20.12.2023; опубликована 28.03.2024
Submitted 13/12/2023; revised 20/12/2023; published 28/03/2024

Носенко Владимир Андреевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология и оборудование машиностроительных производств», Волжский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», Волжский, Россия.
Email: nosenko@volpi.ru. ORCID 0000-0002-5074-1099

Кременецкий Леонид Леонидович – старший преподаватель, Волжский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», Волжский, Россия. Email: kreonid@yandex.ru. ORCID 0000-0002-6973-5844

Коряжкин Андрей Александрович – доктор технических наук, профессор, генеральный директор ЗАО «Новые инструментальные решения», Рыбинск, Россия. Email: Koryazhkin.Andrey@zao-nir.com.

Vladimir A. Nosenko – DrSc (Eng.), Professor, Head of the Department of Technology and Equipment of Machine Building Manufacturing, Volgzhsky Polytechnic Institute (branch) of Volgograd State Technical University, Volgzhsky, Russia. Email: nosenko@volpi.ru. ORCID 0000-0002-5074-1099

Leonid L. Kremenetskii – Senior Lecturer, Volgzhsky Polytechnic Institute (branch) of Volgograd State Technical University, Volgzhsky, Russia. Email: kreonid@yandex.ru. ORCID 0000-0002-6973-5844

Andrey A. Koryazhkin – DrSc (Eng.), Professor, General Director, CJSC New Tooling Solutions (NIR), Rybinsk, Russia. Email: Koryazhkin.Andrey@zao-nir.com.

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 658.562.3
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-1-88-97



ПРИМЕНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ АНАЛИЗА ДЕФЕКТОВ АНОДНО-ОКИСНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ДЕФОРМИРУЕМЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ

Ефремов А.Н.

Публичное акционерное общество «Машиностроительный завод имени М.И. Калинина, г. Екатеринбург»,
Екатеринбург, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Излишне высокие затраты возникают из-за невозможности оптимального подбора режимов нанесения покрытий в промышленных условиях. Это связано с останковкой производства и сложностями перенастройки технического оборудования. Важным и в то же время критическим производственным процессом в гальваническом цехе Публичного акционерного общества «Машиностроительный завод имени М.И. Калинина, г. Екатеринбург» (далее – ПАО «МЗИК») является анодирование алюминия и его сплавов в растворе серной кислоты. Однако до сих пор не удалось повысить качество анодно-окисных покрытий, что приводит к избыточным затратам. **Цель работы.** Целью работы являлся анализ и систематизация дефектов анодно-окисных покрытий на деформируемых алюминиевых сплавах с помощью инструментов статистического анализа, а также применимость статистических методов управления качеством на гальваническом участке ПАО «МЗИК». **Используемые методы.** Анализ, направленный на выявление ключевой проблемы, связанной с возникновением дефектов, включал использование диаграммы Парето. Для более детальной оценки факторов, которые являются основной причиной возникновения наиболее значимых дефектов, была построена причинно-следственная диаграмма с использованием метода «мозгового штурма». **Результаты и практическая значимость.** Определены причины возникновения обнаруженных дефектов и разработаны корректирующие мероприятия по их устранению. Показано, что использование статистических методов позволяет снизить долю брака и находить «узкие места» на всех стадиях производства. Результаты могут быть использованы в качестве основы для создания модели поведения объекта, которая является составляющей частью виртуального элемента цифрового двойника.

Ключевые слова: статистические методы, диаграмма Парето, причинно-следственная диаграмма, диаграмма Исикавы, анодирование алюминия и его сплавов в серной кислоте, анодно-окисное покрытие на алюминии и его сплавах

© Ефремов А.Н., 2024

Для цитирования

Ефремов А.Н. Применение статистических методов для анализа дефектов анодно-окисных покрытий на деформируемых алюминиевых сплавах // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №1. С. 88-97. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-88-97>



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

USING STATISTICAL METHODS FOR ANALYZING DEFECTS OF ANODIC OXIDE COATINGS ON DEFORMABLE ALUMINIUM ALLOYS

Efremov A.N.

PJSC Kalinin Machine-Building Plant, Yekaterinburg, Yekaterinburg, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). Excessively high expenses result from an impossibility to make an optimal choice of coating modes in production. This is attributed to a need to stop the production and complexities of readjusting technological equipment. A crucial and critical technological process at the electroplating shop of Public Joint Stock Company Kalinin Machine-Building Plant, Yekaterinburg (PJSC MZIK) is an anodizing of aluminum and its alloys in a sulfuric acid solution. However, it is still not possible to improve the quality of anodic oxide coatings, leading to excessive costs. **Objectives.** The paper is aimed at analyzing and classifying anodic oxide coating defects found on deformable aluminum alloys, using statistical analysis tools, as well as applicability of statistical methods of quality management at the electroplating shop of PJSC MZIK. **Methods Applied.** To identify a key problem associated with causes of defects, an analysis was carried out using a Pareto chart. To assess in detail factors, presenting a main cause for the most significant defects, a causal diagram was built using a “brainstorming” method. **Results and Practical Relevance.** The causes for detected defects were determined and the corrective measures were developed to eliminate them. It has been shown that the statistical methods contributed to decreasing a share of defects and find “bottlenecks” at all the process stages. The results can be used as a basis for creating an object behavior model, which is a component of the virtual element of the digital twin.

Keywords: statistical methods, Pareto chart, causal diagram, Ishikawa diagram, anodizing of aluminum and its alloys in sulfuric acid, anodic oxide coating on aluminum and its alloys

For citation

Efremov A.N. Using Statistical Methods for Analyzing Defects of Anodic Oxide Coatings on Deformable Aluminium Alloys. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 1, pp. 88-97. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-88-97>

Введение

В Публичном акционерном обществе «Машиностроительный завод им. М.И. Калинина, г. Екатеринбург» (далее – ПАО «МЗИК») к 2030 году планируется завершить строительство нового цеха гальванопокрытий. В реалиях жесткой конкуренции на рынке условием успешности организации является выпуск качественной продукции при минимальной себестоимости производства. В ПАО «МЗИК» нанесение анодно-окисных покрытий на алюминии и его сплавах играет важную и критическую роль в удовлетворении потребностей заказчиков.

Наиболее признанным методом, позволяющим повысить защитные свойства алюминия и его сплавов от коррозии, является оксидирование. За счет формирования на поверхности оксидной пленки детали приобретают не только повышенную коррозионную стойкость в разных средах, но и комплекс ценных функциональных свойств – твердость, износостойкость, электроизоляционную способность и др. [1-7].

Для создания на поверхности алюминия и его сплавов оксидного слоя применяются химическое и электрохимическое оксидирование [1]. Варьируя толщину и структуру покрытия путем изменения условий проведения процесса оксидирования, можно добиться тех значений свойств, которые необходимы при эксплуатации изделия.

Анодное оксидирование является самым распро-

страненным видом обработки алюминия и его сплавов благодаря своей доступности и сравнительной дешевизне. В подавляющем большинстве случаев данный способ эффективно изменяет поверхность деталей, придавая им необходимые структурные, защитные, функциональные и физико-механические свойства.

Производство качественных алюминиевых изделий требует тщательного контроля на каждом этапе их обработки, что особенно важно при проведении анодирования. Анодное оксидирование – это ключевой этап в создании защитного слоя на алюминиевых деталях и сплавах, обеспечивая им повышенную устойчивость к износу и коррозии. Этот процесс начинается с ряда важных подготовительных работ, которые включают в себя очистку поверхности, а также другие процедуры подготовки металла к анодированию. Собственный процесс оксидирования следует после подготовки и является сердцевиной всей операции, где формируется защитная оксидная пленка. Значимым этапом является и заключительная обработка, которая дополняет анодирование и направлена на придание окончательных защитных свойств покрытию.

Между этими ключевыми этапами критически важно проводить тщательные межоперационные промывки. Эти промывки необходимы для удаления остатков химических веществ, например солей, которые могут оставаться после каждого из процессов. Они предотвращают потенциальное загрязнение и

обеспечивают лучшее сцепление слоев материала. Систематический контроль чистоты на каждом этапе является обязательным условием для получения высококачественного и долговечного покрытия.

Финишная обработка, придающая оксидной пленке завершённый вид, представляет собой важнейший финальный шаг в цепочке технологических процессов анодирования алюминия и его сплавов. Эта стадия может включать такие процессы, как окрашивание, герметизация или полировка, что придает деталям не только защитные, но и эстетические качества. Таким образом, всё вышперечисленное демонстрирует сложность и многоступенчатость процесса анодного оксидирования алюминия, подчеркивая важность каждой отдельно взятой операции и межоперационной промывки для создания качественного и долговечного продукта.

Проведенные различными отечественными и зарубежными учеными исследования в области электрохимического оксидирования алюминия и его сплавов позволили выявить механизм образования оксидной пленки, а также влияние условий ведения процесса анодирования на ее основные свойства. Аккумулирован и большой производственный опыт применения технологий анодного оксидирования алюминия и его сплавов, представленный в справочной литературе [1-7].

Оксидирование может быть выполнено различными способами, включая оксидирование в водных электролитических растворах, плазменно-электролитическое оксидирование, в расплавах солей и в газовой плазме. Плазменно-электролитическое оксидирование имеет несколько подвидов, включая микродуговое оксидирование [2]. Однако наиболее широко применяется способ оксидирования в водных растворах электролитов, который обладает множеством преимуществ перед другими методами. Он легко автоматизируется и не требует мощных источников тока [3-7].

В настоящее время для анодного оксидирования алюминия и его сплавов предложены и используются в промышленных масштабах как кислые, так и щелочные электролиты, а также множество добавок к ним [1].

В промышленной практике наиболее распространены три основных электрохимических способа оксидирования – с использованием серной, хромовой и щавелевой кислот. Анодное оксидирование в растворе серной кислоты является наиболее распространенным методом в промышленности, включая ПАО «МЗИК». Его популярность объясняется рядом экономических преимуществ, возможностью легкой автоматизации и использованием переменного или постоянного тока. Этот метод позволяет получать оксидные покрытия с высокой адсорбционной способностью к различным типам покрытий, включая лакокрасочные или теплозащитные [3-7].

На рис. 1 представлена принципиальная схема технологического процесса анодного оксидирования алюминия и его сплавов, реализованная на участке гальванопокрытий ПАО «МЗИК».

Перечень требований к качеству анодно-окисных покрытий на алюминии и его сплавах регламентирован тремя документами, стандартизованными на ПАО «МЗИК»: ГОСТ 9.301-86, ГОСТ 9.031-74 и ПИ 1.2.616-2003. Правила приемки и методики контроля описаны в ГОСТ 9.302-88.

Для оценки качества анодно-окисных покрытий на алюминии и его сплавах в данных стандартах регламентированы толщина, защитные свойства, степень наполнения и внешний вид. Однако в настоящее время не удалось сократить количество несоответствий в качестве анодно-окисных покрытий, что приводит к дополнительным расходам. Одним из способов оптимизации производственных процессов для решения возникающих проблем является разработка подходящей модели операции и применение статистических методов для управления качеством продукции. Поэтому целью настоящего исследования является анализ и систематизация дефектов анодно-окисных покрытий на деформируемых алюминиевых сплавах, полученных из сернокислого электролита на гальваническом участке ПАО «МЗИК», с помощью инструментов статистического анализа, а также применимость статистических методов на производственном участке ПАО «МЗИК».

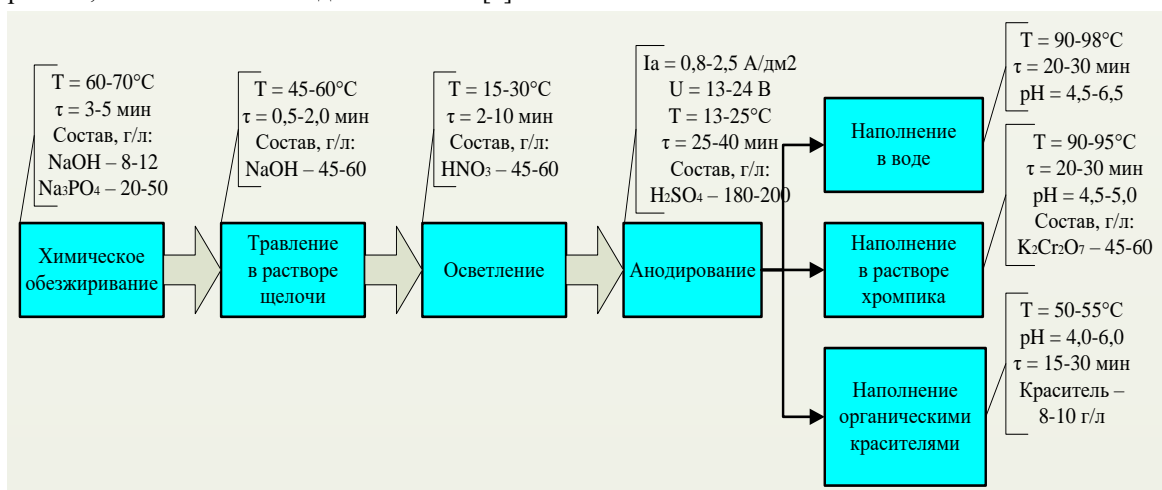


Рис. 1. Принципиальная схема технологического процесса анодного оксидирования алюминия и его сплавов
 Fig. 1. A process flow diagram of anodizing aluminum and its alloys

Материалы и методы исследования

В настоящей статье проводится анализ результатов контроля качества анодно-окисных покрытий на деформируемых алюминиевых сплавах, нанесенных методом анодного оксидирования в сернокислом электролите на участке гальванопокрытий ПАО «МЗИК» в период с сентября 2021 по август 2022 года включительно. Составы растворов электролитов и технологические параметры ведения процесса представлены на **рис. 1**.

Эксперименты проводились на действующей полуавтоматической линии анодного оксидирования гальванического участка ПАО «МЗИК» в режиме реального времени. Для контроля параметров покрытий совместно с деталями на подвеску монтировались контрольные образцы. После анодирования на контрольных образцах исследовались такие параметры, как внешний вид, толщина, степень наполнения, защитные свойства.

Исследования проводились в потенциостатическом режиме с автоматической регистрацией на цифровой носитель силы тока, температуры и продолжительности процесса анодирования. Методика изготовления и подготовки контрольных образцов подробно описана в [18].

Контроль внешнего вида на выявление дефектов поверхности анодно-окисных покрытий осуществлялся внешним осмотром контрольных образцов невооруженным глазом на расстоянии 25 см от контролируемой поверхности при искусственном освещении не менее 300 лк.

Толщину покрытия на образцах определяли гравиметрически. После оксидирования контрольные образцы высушивались при температуре 60-70°C в течение 30 мин и после остывания взвешивались на аналитических весах Sartorius QUINTIX 224-10RU (Sartorius, Германия) с точностью до четвертого десятичного знака. Затем удаляли с образцов покрытие в растворе, содержащем 32-37 г/л H_3PO_4 и 20-25 г/л CrO_3 , при температуре 90-100°C. Объем травящего раствора должен быть 10 мл на 1 cm^2 покрытия.

Согласно ГОСТ 9.302-88, отсутствие покрытия на образцах можно определить методом капли. Несколько капель испытательного раствора (раствор №34) были нанесены на различные участки образца. Если капля мгновенно меняла свой цвет с оранжевого на зеленый, это свидетельствовало об отсутствии покрытия.

После удаления покрытия образцы были промыты водой, высушены и снова взвешены. Для определения массы анодного покрытия была вычислена разность массы образца после анодного оксидирования и после удаления покрытия.

Среднюю толщину анодно-окисного покрытия рассчитывали по формуле

$$\delta = \frac{0,1 \cdot P_{cp} \cdot 1,4}{3,42} = 0,04 \cdot P_{cp}, \quad (1)$$

где δ – толщина покрытия, мкм; 0,1 – коэффициент; P_{cp} – средняя масса покрытия на 1 dm^2 поверхности, мг; 3,42 – плотность покрытия, g/cm^3 ; 1,4 – поправочный коэффициент к плотности покрытия.

Для оценки степени наполнения образцов использовался метод потери массы, основанный на обработке образца с покрытием в испытательном растворе. Этот метод позволял определить потерю массы образца и, таким образом, определить степень наполнения. Для оценки качественной характеристики покрытия был проведен эксперимент следующего характера. Покрытый образец был помещен в раствор HNO_3 с концентрацией 500 г/л при температуре $20 \pm 5^\circ C$. После этого образец проходил процедуры промывки и сушки. Если покрытие теряло свой цвет после контакта с HNO_3 , то оно считалось неудовлетворительным.

В случае если покрытие не теряло цвет, образец помещался в эксикатор на 20 мин и после этого взвешивался. Затем образец погружался в испытательный раствор (10 г/л Na_2SO_4 , который доводят до pH = 3,6-3,8 раствором CH_3COOH , а затем раствором 500 г/л H_2SO_4 до pH = 2,5) при температуре $90 \pm 2^\circ C$ на 20 мин, промывался, высушивался, выдерживался в эксикаторе 20 мин и снова взвешивался.

Потеря массы рассчитывалась по уравнению

$$\Delta m = \frac{m_1 - m_2}{S}, \quad (2)$$

где Δm – уменьшение массы оксидного покрытия, mg/dm^2 ; m_1 – масса детали с нанесенным анодным покрытием, мг; m_2 – масса детали после снятия покрытия в растворе 34, мг; S – площадь поверхности исследуемого образца, dm^2 .

Согласно ПИ 1.2.616-2003 оценка результатов испытаний основана на следующем критерии: снижение массы тестируемых образцов после процедуры не должна превосходить установленный предел. Для изделий, используемых под открытым небом, этот предел установлен на уровне не более 20 mg/dm^2 , в то время как для продукции, предназначенной для использования в помещениях, лимит составляет 30 mg/dm^2 .

Защитные свойства анодно-окисных покрытий на алюминиевых сплавах испытывались с помощью ускоренных коррозионных испытаний методом капли. При проведении исследований методом капли на поверхность покрытия образцов наносили 2-4 капли раствора, содержащего 250 мл/л HCl ($\rho = 1,19 g/cm^3$) и 30 г/л $K_2Cr_2O_7$, выдерживали определенное время в зависимости от типа сплава и температуры проведения испытаний и наблюдали за изменением цвета капли. Признак неудовлетворительного качества покрытия – изменение цвета капли от оранжевого до зеленого, что свидетельствует о проникновении коррозионного процесса до основного металла.

Для сбора и систематизации данных по контролю качества анодно-окисных покрытий на алюминиевых сплавах использовались контрольные листки. Для выявления основной проблемы и причин несоответствий был проведен анализ с использованием диаграммы Парето. Для определения наиболее значимых дефектов был применен групповой метод анализа

причин, также известный как метод «мозгового штурма», и была построена причинно-следственная диаграмма Исикавы. Основные принципы и методики построения диаграмм Парето и Исикавы подробно описаны в [9].

Результаты исследования и их обсуждение

Для построения диаграммы Парето обнаруженные дефекты были рассортированы по 11-ти группам. Результаты данных контроля, послужившие исходными данными для построения диаграммы Парето, представлены в **табл. 1**.

Таблица 1. Начальная информация для создания диаграммы Парето

Table 1. Initial information used to build the Pareto chart

Номер дефекта	Вид дефекта	Число дефектов
1	Сползание или рыхлость покрытия	27
2	1) Отсутствие пленки 2) Отсутствие покрытия на отдельных участках детали 3) Тонкое покрытие (недостаточная толщина) в виде радужных пятен 4) Низкая коррозионная стойкость покрытия (не выдерживает капельную пробу)	61
3	Питтинг, темные пятна и растравливание покрытия	45
4	Растравливание покрытия	34
5	Темные полосы и пятна на покрытии	22
6	Темный налет в виде точек и пятен	14
7	Прижог, прогар (цвета побежалости, пятна)	7
8	Серый порошкообразный налет на деталях	3
9	Темные полосы на профилях, выявляющиеся после анодирования	8
10	Темное покрытие	9
11	Хрупкость покрытия	17

Диаграмма Парето на **рис. 2** отображает обнаруженные дефекты анодно-окисного покрытия на алюминии и его сплавах на гальваническом участке ПАО «МЗИК» за период с сентября 2021 по август 2022 года.

Согласно данным на диаграмме (**рис. 2**), наиболее значимым дефектом является дефект №2. Поэтому первоочередной задачей является устранение причин его возникновения. Для анализа факторов, влияющих на появление дефекта №2, была использована диаграмма Исикавы с применением метода «мозгового штурма» (**рис. 3**).

Следует отметить, что марка используемого материала и способ изготовления заготовки (причина А1), состав электролита и параметры процесса анодирования (причина С), а также работа гальваника,

осуществляющего технологические операции на линии (причина D), могут быть основными причинами дефекта №2, согласно диаграмме Исикавы.

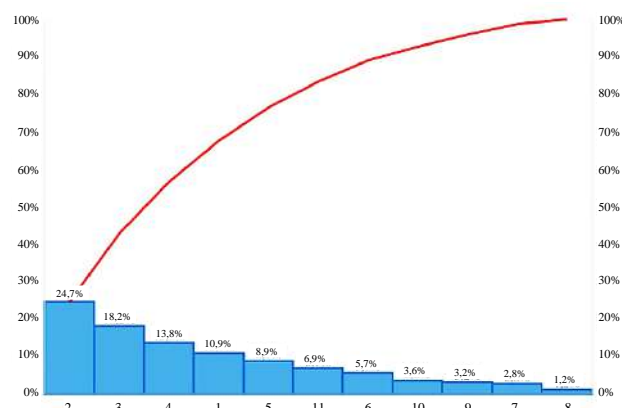


Рис. 2. Диаграмма Парето по дефектам оксидных покрытий на гальваническом производстве ПАО «МЗИК»

Fig. 2. The Pareto chart of detected defects of oxide coatings at the electroplating shop of PJSC MZIK

Исследование показало, что эти четыре причины составляют 92% всех дефектов. Для более точного анализа необходимо выяснить, какие типы дефектов связаны с каждой из этих причин и существует ли между ними взаимосвязь.

На **рис. 4** приведена усовершенствованная причинно-следственная диаграмма, основанная на данных из **табл. 1**. В этой улучшенной версии диаграммы внесены следующие изменения [9]:

1. В верхней части диаграммы представлены только те причины, которые полностью соответствуют традиционной диаграмме. Они обозначены опорными точками А, В, С, D.

2. Нижняя часть диаграммы наглядно демонстрирует последствия, связанные с причинами, отмеченными на соответствующих ветвях. Эти последствия выражены в процентах дефектов, которые были выявлены при использовании экспертного метода.

Из **рис. 4** видно, что основными причинами дефектов являются методы и материал изготовления детали (причины А), оборудование для анодирования (причины В), технологические параметры линии анодирования (причины С) и собственно персонал, выполняющий работы на участке (причины D).

Действительно коррозионная стойкость покрытий зависит от типа сплава подложки и состояния поверхности перед покрытием (причины А). Поверхность деталей может также содержать загрязнения, которые негативно сказываются на качестве покрытия (масла, смазки и др.). Кроме того, в приповерхностном слое алюминиевых сплавов содержатся легирующие добавки, которые также могут привести к ухудшению свойств получаемых покрытий.

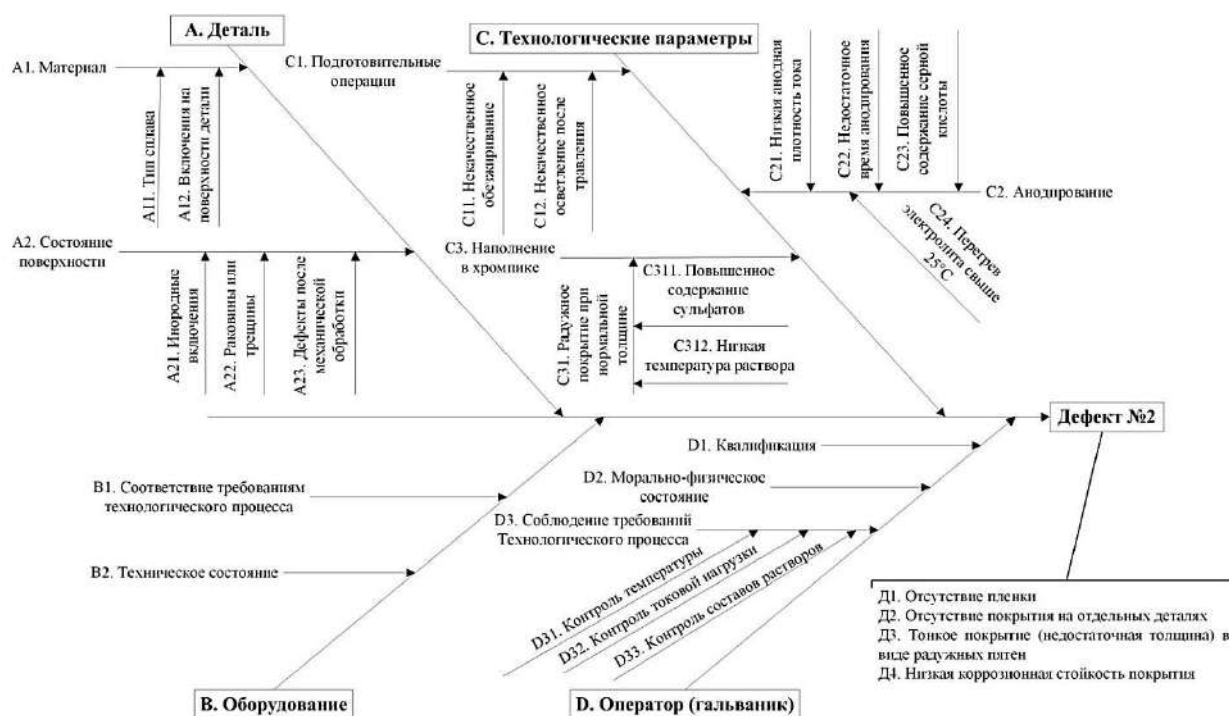


Рис. 3. Причинно-следственная диаграмма по обнаруженному дефекту №2 в стандартной форме
 Fig. 3. A causal diagram of detected defect No. 2 in the standard form

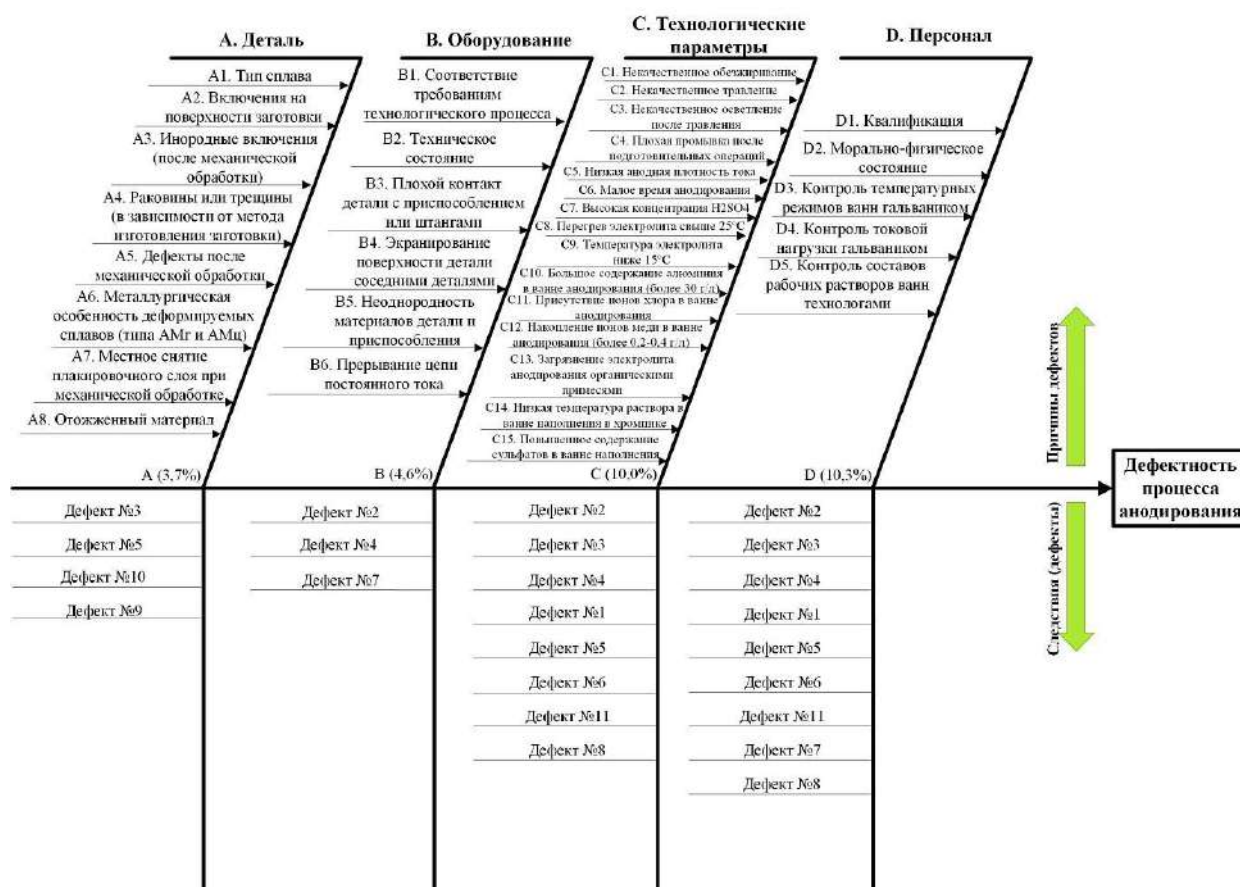


Рис. 4. Предлагаемая форма диаграммы Исикавы, построенная «по ходу» технологического процесса по всем обнаруженным дефектам

Fig. 4. A proposed form of the Ishikawa diagram built “in the course” of the technological process for all the detected defects

Наивысшая коррозионная стойкость наблюдается у покрытий, полученных на чистом алюминии [1]. Введение в состав алюминия таких примесей, как медь, кремний, железо, марганец, магний, улучшает механические свойства сплава, но снижает защитную способность получаемых анодно-окисных покрытий. Это обусловлено образованием интерметаллидов на поверхности, их разрушением и, как следствие, увеличением пористости получаемого покрытия. Чем меньше примесей в сплаве, тем однороднее получается покрытие, тем больше его толщина и меньше пористость покрытия.

К оборудованию (причины В) относятся не только выпрямители, ванны, бортовые отсосы и т.д., но и подвесочные приспособления и штанги. Правильный выбор технологической оснастки и последующий грамотный монтаж деталей на нее во многом определяют равномерность распределения электрических и тепловых полей внутри ванны анодирования, что сказывается на появлении дефектов №2, 4, 7. Поэтому в данном случае причины В напрямую коррелируют с причинами D, поскольку именно технолог и гальванщик отвечают за вышеупомянутые действия.

Эффективность оксидирования алюминия и его сплавов в значительной степени зависит от правильного выполнения предварительных операций подготовки. В процессе оксидирования сплавов алюминия на ПАО «МЗИК» проводятся химическое обезжиривание, травление и осветление поверхности деталей (см. рис. 1).

Химическое обезжиривание основано на нейтрализации жирных кислот и удалении растительных и животных жиров и масел. Применение добавки Na_3PO_4 улучшает качество воды и упрощает процесс смычки воды с поверхности изделий во время промывки. Эффективность эмульгирующего действия обезжиривающего раствора зависит от правильной концентрации щелочи (NaOH) и фосфата натрия (Na_3PO_4). Если концентрация щелочи слишком высока, это может снизить энергию на межфазной границе двух нерастворимых жидкостей. Также изменение содержания Na_3PO_4 может повлиять на результаты очистки поверхности. Для наиболее эффективного удаления минеральных масел и смазок рекомендуется проводить процесс при повышенных температурах, так как они плохо удаляются при нормальной температуре. Однако следует проявлять осторожность при повышении температуры, так как это может вызвать ускоренное травление и негативно повлиять на геометрию и состояние поверхности деталей. При продолжительном нахождении деталей в ванне для обезжиривания возможно растравливание поверхности и образование осадка фосфатов. Это может происходить также при превышении нормальной температуры раствора, высокой концентрации Na_3PO_4 или избыточном содержании щелочей, что приводит к образованию белого порошка на деталях (причина С1).

Травление в растворе щелочи проводится с целью удаления с поверхности деталей окалины, ржавчины или окисных слоев, образующихся при механической, термической, химической обработке или под воздействием окружающей среды. Несоблюдение технологических режимов операции травления, в частности передержка детали или перегрев раствора, а также завышенная концентрация NaOH приводят к растравливанию поверхности детали (причина С2).

Осветление в азотной кислоте необходимо для удаления темного налета легирующих примесей, образующегося после травления, а также оставшихся пятен, ухудшающих внешний вид деталей. При низкой концентрации HNO_3 в растворе или недостаточной продолжительности процесса на поверхности остается темный налет оксида меди или следы пригоревшей смазки. Наличие контактно высидившейся меди на поверхности алюминия после осветления свидетельствует о высокой концентрации ионов меди в растворе. Все дефекты поверхности, видимые на поверхности после осветления, будут неблагоприятно влиять на внешний вид анодно-окисного покрытия.

Немаловажным аспектом являются и промывочные операции после каждой из подготовительных операций (причина С4). Основная цель промывки – не только удаление соединений и остатков предыдущих операций с поверхности изделий, но и снижение их попадания в сточные воды при экономичном использовании воды.

Некачественная промывка приводит к появлению дефектов №3, 4 и 5.

В табл. 2 систематизирована и показана взаимосвязь причин и дефектов, а также представлены корректирующие мероприятия для их устранения применительно к ванне анодного оксидирования.

После анодного оксидирования для повышения коррозионной стойкости покрытий чаще всего применяют наполнение пор дихроматами. В данной операции решающими факторами, влияющими на степень наполнения, являются толщина и пористость анодно-окисного покрытия. Недостаточная толщина покрытия приводит к бледной окраске и неудовлетворительной коррозионной стойкости покрытия (недостаточное время выдержки при капельной пробе). Кроме того, низкая температура раствора и избыток сульфатов в ванне наполнения также приводят к подобным дефектам покрытия. Повышенное содержание сульфатов может вызвать растравливание покрытия. Немаловажное значение в ванне наполнения играет рН раствора: при $\text{pH} > 5,5$ образуется мажущееся покрытие, при $\text{pH} < 4,5$ образуется «липкое» покрытие. К липкости покрытия также приводят низкая температура раствора, недостаточное время наполнения и покрытие большой толщины при малой пористости. Корректировку рН раствора следует проводить для его понижения до значений 4,5-5,0 хромовым ангидридом, для повышения рН – добавлением кальцинированной соды.

Таблица 2. Перечень дефектов анодно-окисных покрытий на алюминиевых деформируемых сплавах, возможные причины их возникновения и корректирующие мероприятия по их устранению
 Table 2. A list of defects of anodic oxide coatings found on aluminum deformable alloys, potential causes and corrective measures

Номер дефекта	Вид дефекта	Код причины	Возможная причина возникновения	Корректирующие мероприятия
1	Сползание или рыхлость покрытия	C8	Перегрев электролита свыше 25°C	Охладить электролит перемешиванием
		C6	Завышенное время анодирования	Снизить продолжительность оксидирования
		C10	Большое содержание Al^{3+} в растворе (более 30 г/л)	Откорректировать электролит, слив половину
2	1) Отсутствие пленки 2) Отсутствие покрытия на отдельных участках детали 3) Тонкое покрытие (недостаточная толщина) в виде радужных пятен 4) Низкая коррозионная стойкость покрытия (не выдерживает капельную пробу)	B3	Плохой контакт детали с приспособлением	Улучшить контакт
		B4	Экранирование поверхности детали	Изменить способ монтажа
		C5	Низкая анодная плотность тока	Повысить плотность тока до 1-2 А/дм ²
		C6	Недостаточное время анодирования	Увеличить продолжительность анодирования
		C7	Повышенное содержание H_2SO_4 в электролите	Откорректировать электролит (разбавить водой)
		C8	Перегрев электролита свыше 25°C	Охладить электролит перемешиванием
3	Питтинг, темные пятна и растравливание покрытия	C11	Присутствие ионов Cl^- в электролите	Сменить электролит
		C8	Температура раствора свыше 30°C	Охладить электролит перемешиванием
		C4	Плохая промывка деталей после подготовки	Улучшить качество промывки
		A1	Большое содержание меди в составе сплава	Применять другой электролит
4	Растравливание покрытия	C4	Плохая промывка от H_2SO_4 после анодирования	Улучшить качество промывки
		C4	Плохая промывка от HNO_3 после осветления	Улучшить качество промывки
		B6	Прерывание цепи постоянного тока	Не допускать прерывания тока при анодировании
		C8	Перегрев электролита свыше 25°C	Охладить электролит перемешиванием
		C6	Завышенное время анодирования	Снизить продолжительность оксидирования
		C7	Повышенное содержание H_2SO_4 в электролите	Откорректировать электролит (разбавить водой)
		B5	Неоднородность материалов деталей и подвески	Заменить материал подвески
5	Темные полосы и пятна на покрытии	C12	Накопление Cu^{2+} в электролите в количестве более 0,2-0,4 г/л	Проработка электролита со стальными катодами при плотности тока 1-2 А/дм ² или замена электролита
		A5	Местный прижог при механической обработке	Не является браковочным признаком по ГОСТ 9.301
		C4	Плохая промывка деталей после подготовки	Улучшить качество промывки
		A1	Большое содержание меди в составе сплава	Применить другой электролит
6	Темный налет в виде точек и пятен	C13	Загрязнение электролита органическими примесями	Фильтрация электролита; обработка в HNO_3
7	Прижог, прогар (цвета побежалости, пятна)	B3	Плохой контакт детали с приспособлением	Улучшить контакт
8	Серый порошкообразный налет на деталях	C1-C3	Некачественная подготовка деталей перед покрытием	Улучшить качество подготовительных операций
9	Темные полосы на профилях, выявляющиеся после анодирования	A6	Металлургическая особенность деформируемых сплавов (типа АМг и АМц)	Длительная выдержка в азотной кислоте (до 60 мин) перед повторным анодированием
		A7	Местное снятие лакировочного слоя при механической обработке	
10	Темное покрытие	A8	Отожженный материал	Провести закалку и повторно анодировать детали
11	Хрупкость покрытия	C9	Температура электролита ниже 15°C	Нагреть электролит (отключить перемешивание)

Взаимосвязь причин С и D (см. рис. 4) очевидна, ведь все операции на линии анодирования выполняются оператором линии (гальваником), а контроль составов электролитов закреплен за технологами гальванического участка. Поэтому разработка модели прогнозирования качества покрытий при различных условиях производства на основе статистических методов является эффективным подходом для уменьшения влияния человеческого фактора при установлении технологических режимов.

Заключение

Таким образом, на реальном производственном объекте проведен анализ и систематизация дефектов анодно-окисных покрытий на алюминиевых деформируемых сплавах, получаемых из сернокислого электролита методом электрохимического оксидирования (анодирования). Методами статистического анализа определены причины возникновения обнаруженных дефектов и разработаны корректирующие мероприятия по их устранению.

По результатам исследований, проведенных в работах [8, 10], выяснено, что наиболее значимыми свойствами, определяющими все показатели качества анодно-окисных покрытий на алюминии и его сплавах, являются толщина, пористость и микротвердость. Кроме того, нормативная документация также подтверждает важность этих свойств. Поэтому для создания модели физических процессов виртуального элемента цифрового двойника линии анодирования необходимо учесть математические модели указанных свойств, построенных с учетом технологических параметров анодирования.

В настоящее время одной из ключевых задач является разработка цифровой модели объекта, которая будет точно воспроизводить его геометрию, физические свойства и поведение системы, а также учитывать особенности функционирования. Такая модель поможет оптимизировать процессы подготовки и производства, сократить расходы на материалы, уменьшить потери металла из-за брака и уменьшить роль человеческого фактора.

Данная статья является продолжением цикла работ, результаты данной работы будут использованы в качестве основы для создания модели поведения объекта, которая является еще одной составляющей частью виртуального элемента цифрового двойника.

В рамках завершения исследования была разработана модель, которая сможет воспроизводить динамику получения анодно-окисных покрытий на алюминии и его сплавах, интегрируя информацию с производственной линии. Этот инструмент станет одним из ключевых в создании цифрового прототипа для анодирования, моделируя его работу в виртуальном пространстве.

Список источников

1. Скопинцев В.Д., Марголин Л.Н., Фарафонов В.Л. Развитие технологии анодного оксидирования

алюминия и его сплавов. Обзор публикаций за 2007-2018 г. // Гальванотехника и обработка поверхности. 2019. Т. 27. №2. С. 9-22. DOI: 10.47188/0869-5326-2019-27-2-9

2. Влияние технологических параметров на свойства покрытий, синтезируемых методом микродугового оксидирования / Печерская Е.А., Голубков П.Е., Карпанин О.В., Козлов Г.В., Зинченко Т.О., Смогунов В.В. // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2020. №2(32). С. 89-99. DOI: 10.21685/2307-5538-2020-2-11
3. Porous alumina films fabricated by reduced temperature sulfuric acid anodizing: morphology, composition and volumetric growth / Poznyak A.A., Pligovka A., Laryn T. and Salerno M. // Materials. 2021, vol. 14, no. 4, pp. 1-16. DOI: 10.3390/ma14040767
4. Mechanical and tribological properties of anodic Al coatings as a function of anodizing conditions / Enkeleda Dervishi, Michael McBride, Randall Edwards, Moraya Gutierrez, Nan Li, Raven Buntyn, Daniel E. Hooks // Surface and coatings technology. 2022, vol. 444, 128652. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2022.128652
5. Patermarakis G. The multimodal dependence of anodic alumina film porous nanostructure on anodizing potential // Current topics in electrochemistry. 2020, vol. 22, pp. 1-17.
6. Effect of anodizing conditions on the cell morphology of anodic films on AA2024-T3 alloy / Jeanette M. Torrescano-Alvarez, Michele Curioni, Xiaorong Zhou, Peter Skeldon // Surface and interface analysis. 2019, vol. 51, no. 12, pp. 1135-1143. DOI: 10.1002/sia.6562
7. Patermarakis G., Triantis T.M. Transformation of porous nanostructure and self-ordering of anodic alumina films during potentiostatic anodizing of aluminium // Current topics in electrochemistry. 2019, vol. 21, pp. 21-39.
8. Ефремов А.Н. Математическая модель прогнозирования толщины анодно-окисного покрытия на алюминиевом сплаве АМг6 // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2023. №2. С. 66-80. DOI: 10.38013/2542-0542-2023-2-66-80
9. Управление качеством. Современные статистические методы контроля и управления качеством продукции в производстве / Юдин С.В., Остапенко С.Н., Протасьев В.Б., Кривов А.С., Гурьянов В.П., Юдин А.С., Волков М.В., Палихов Г.В.; под ред. проф. Остапенко С.Н. М., 2020. 184 с.
10. Ефремов А.Н. Архитектура математической модели прогнозирования качества анодно-окисных покрытий на алюминии и его сплавах // Евразийский союз ученых. Серия: технические и физико-математические науки. 2022. Т. 1. №10 (103). С. 6-13. DOI: 10.31618/ESU-2413-9335-2022-1-103-1730

References

1. Skopintsev V.D., Margolin L.N., Farafonov V.L. Development of the anodizing technology for aluminum and its alloys. Review of publications for 2007-2018.

- Galvanotekhnika i obrabotka poverkhnosti* [Electroplating and Surface Treatment]. 2019;27(2):9-22. (In Russ.) DOI: 10.47188/0869-5326-2019-27-2-9
2. Pecherskaya E.A., Golubkov P.E., Karpanin O.V., Kozlov G.V., Zinchenko T.O., Smogunov V.V. The influence of technological parameters on the properties of coatings synthesized by microarc oxidation. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol* [Measuring. Monitoring. Management. Control]. 2020;(2(32)):89-99. (In Russ.) DOI: 10.21685/2307-5538-2020-2-11
 3. Poznyak A.A., Pligovka A., Laryn T., Salerno M. Porous alumina films fabricated by reduced temperature sulfuric acid anodizing: morphology, composition and volumetric growth. *Materials*. 2021;14(4):1-16. DOI: 10.3390/ma14040767
 4. Enkeleda Dervishi, Michael McBride, Randall Edwards, Moraya Gutierrez, Nan Li, Raven Buntyn, Daniel E. Hooks. Mechanical and tribological properties of anodic Al coatings as a function of anodizing conditions. *Surface and Coatings Technology*. 2022;444:128652. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2022.128652
 5. Patermarakis G. The multimodal dependence of anodic alumina film porous nanostructure on anodizing potential. *Current Topics in Electrochemistry*. 2020;22:1-17.
 6. Jeanette M. Torrescano-Alvarez, Michele Curioni, Xiaorong Zhou, Peter Skeldon. Effect of anodizing conditions on the cell morphology of anodic films on AA2024-T3 alloy. *Surface and Interface Analysis*. 2019;51(12):1135-1143. DOI: 10.1002/sia.6562
 7. Patermarakis G., Triantis T.M. Transformation of porous nanostructure and self-ordering of anodic alumina films during potentiostatic anodizing of aluminium. *Current Topics in Electrochemistry*. 2019;21:21-39.
 8. Efremov A.N. A mathematical model for predicting thickness of the anodic oxide coating on AMg6 aluminum alloy. *Vestnik Kontserna VKO Almaz – Antey* [Journal of Almaz – Antey Air and Space Defense Corporation]. 2023;(2):66-80. (In Russ.) DOI: 10.38013/2542-0542-2023-2-66-80
 9. Yudin S.V., Ostapenko S.N., Protasiev V.B., Krivov A.S., Guryanov V.P., Yudin A.S., Volkov M.V., Palikhov G.V. *Upravlenie kachestvom. Sovremennye statisticheskie metody kontrolya i upravleniya kachestvom produktsii v proizvodstve* [Quality management. Modern statistical methods of product quality control and management in industry]. Moscow: 2020, 184 p. (In Russ.)
 10. Efremov A.N. Architecture of a mathematical model for predicting the quality of anodic oxide coatings on aluminum and its alloys. *Evrazijskiy soyuz uchenykh. Seriya: Tekhnicheskie i fiziko-matematicheskie nauki* [The Eurasian Union of Scientists. Series: Technical and Physical and Mathematical Sciences]. 2022;1(10(103)):6-13. (In Russ.) DOI: 10.31618/ESU-2413-9335-2022-1-103-1730

Поступила 21.11.2023; принята к публикации 28.01.2024; опубликована 28.03.2024
Submitted 21/11/2023; revised 28/01/2024; published 28/03/2024

Ефремов Андрей Николаевич – аспирант, начальник бюро технического контроля, Публичное акционерное общество «Машиностроительный завод им. М.И. Калинина, г. Екатеринбург», Екатеринбург, Россия. Email: andrey_effremuss@mail.ru. ORCID 0000-0003-0023-3202

Andrey N. Efremov – postgraduate student, Head of the Technical Control Bureau, Public Joint Stock Company Kalinin Machine-Building Plant, Yekaterinburg, Yekaterinburg, Russia. Email: andrey_effremuss@mail.ru. ORCID 0000-0003-0023-3202



ПОВЫШЕНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЛИННОМЕРНЫХ СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Кленько С.В.¹, Астащенко В.И.², Сафаров Д.Т.², Харисов И.Ж.¹, Орлянский В.Е.¹

¹ ПАО «Камский автомобильный завод», Набережные Челны, Россия

² Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета, Набережные Челны, Россия

Аннотация. Постановка задачи. Выполнен анализ стендовых испытаний балки передней оси грузового автомобиля КАМАЗ. Приведены показатели состава, структуры, твердости и циклической долговечности деталей, изготовленных из улучшаемой стали 45X. Исследовано влияние твердости и поверхностного наклепа дробью деталей на циклическую стойкость. Показана положительная роль наклепа деталей стальной дробью ДСЛУ-2.2 в части нейтрализации обезуглероженного слоя и других поверхностных дефектов. Установлено необходимое значение твердости металла основы детали для удовлетворительной обрабатываемости резанием поковок и достижения заданной стойкости балки передней оси при циклическом нагружении. Определено рациональное время дробеобработки и температурно-временные параметры термического улучшения поковок, которые обосновывают долговечность деталей на уровне 1 млн циклов и более. Технология поверхностного наклепа и термической обработки реализованы в производствах ПАО «КамАЗ» и рекомендуются к внедрению на предприятиях машиностроения и в других отраслях промышленности. Для определения степени поверхностного наклепа деталей дробью разработано и внедрено устройство, в котором размещены пластинки Альмена в наиболее ответственных местах изделия. **Цель работы.** Разработаны технологические решения по повышению циклической долговечности длинномерных стальных деталей машин. **Используемые методы.** Использованы металлографический анализ, статистические методы обработки экспериментальных данных. **Новизна.** Найдены оптимальные параметры дробенаклепа поверхностного слоя длинномерных деталей, обеспечивающие циклическую долговечность на уровне 1 млн циклов и более. **Результат.** Разработана технология упрочнения поверхностного слоя длинномерных деталей, повышающая их циклическую долговечность. **Практическая значимость.** Технология внедрена в производственный процесс изготовления длинномерных деталей на Кузнечном заводе ПАО «КамАЗ».

Ключевые слова: детали автомобиля, сталь, структура, твердость, поверхностный слой, дефекты металла, дробенаклеп, пластинка Альмена, циклическая долговечность, контроль качества

© Кленько С.В., Астащенко В.И., Сафаров Д.Т., Харисов И.Ж., Орлянский В.Е., 2024

Для цитирования

Повышение циклической долговечности длинномерных стальных деталей машин / Кленько С.В., Астащенко В.И., Сафаров Д.Т., Харисов И.Ж., Орлянский В.Е. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №1. С. 98-106. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-98-106>



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

INCREASING CYCLIC DURABILITY OF LONG-LENGTH STEEL MACHINE PARTS

Klenko S.V.¹, Astashchenko V.I.², Safarov D.T.², Kharisov I.Zh.¹, Orlyansky V.E.¹

¹ PJSC Kama Automobile Plant, Naberezhnye Chelny, Russia

² Naberezhnye Chelny Institute (branch) of Kazan (Volga Region) Federal University, Naberezhnye Chelny, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The authors analyzed bench tests of a front axle beam of KAMAZ trucks. The paper presents values of the composition, structure, hardness and cyclic durability of parts made of heat-hardenable steel 45X, and describes the influence of hardness and surface shot blasting of parts on cyclic durability. A positive role of shot blasting of parts with DSLU-2.2 improved cast steel shots is shown in terms of removing the decarbonized layer and other surface defects. The authors determined the steel hardness value of the base of the part required to achieve satisfactory machinability by cutting forgings and specified resistance of the front axle beam under cyclic loading; and a reasonable period of shot blasting, and temperature/time parameters of thermal refining of forgings, providing a rationale for a durability of parts of 1 million cycles or more. The technology of surface shot blasting and heat treatment was applied at the production facilities of PJSC KAMAZ and recommended for their introduction at machine-building enterprises in other industries. To determine the degree of surface shot blasting of parts, the authors developed and introduced a device, containing Almen strips in the most critical points of the product. **Objective.** The study is aimed at developing technological solutions to improve cyclic durability of long-length steel machine parts. **Methods Applied.** The authors applied metallographic analysis and statistical methods of processing experimental data. **Originality.** The paper presents the determined optimal parameters of surface shot blasting of long-length parts, providing a cyclic durability of 1 million cycles or more. **Result.** The developed technology of surface hardening of long-length parts contributes to increasing their cyclic durability. **Practical Relevance.** The technology has been introduced into the process of manufacturing long-length parts at the Forging Plant of PJSC KAMAZ.

Keywords: car parts, steel, structure, hardness, surface layer, steel defects, shot blasting, Almen strip, cyclic durability, quality control

For citation

Klenko S.V., Astashchenko V.I., Safarov D.T., Kharisov I.Zh., Orlyansky V.E. Increasing Cyclic Durability of Long-Length Steel Machine Parts. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 1, pp. 98-106. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-98-106>

Введение

В производственном цикле изготовления большинства деталей автомобиля используются разносторонние и хорошо изученные виды обработки: горячая пластическая деформация, правка и чеканка, термическая и механическая обработка, упрочняющие технологии, декоративные и антикоррозионные покрытия. Причем на отдельных деталях, и в первую очередь на длинномерных, имеются поверхности, которые не подвергаются механической и упрочняющей обработке. Примером такого изготовления деталей может служить балка передней оси грузового автомобиля КАМАЗ. Качество поверхности многих участков на этой детали наследованы от технологий кузнечного производства и, соответственно, на них присутствуют обезуглероженный слой, вмятины, складки металла, зажимы, заштампованная окалина и другие дефекты. В условиях эксплуатации поверхностей слой детали подвергается наиболее сильному воздействию – механическому, тепловому, коррози-

онному и т.д. Незначительные повреждения или дефекты строения поверхности служат очагами зарождения усталостных трещин, которые в итоге вызывают разрушение детали при ее циклическом нагружении. На **рис. 1** приведены примеры разрушения балок передней оси по причине заштампованной окалины (**рис. 1, а, б**) и складок материала по линии обрезки облоя (**рис. 1, в, г**).

Эффективными способами по нейтрализации таких дефектов служат технологии, направленные на обеспечение заданного изменения свойств поверхностного слоя. Для достижения этих целей в промышленности используют процессы химико-термической обработки, поверхностно-пластического деформирования и др. За счет использования качественного материала [1-3], придания чистоты поверхности [4-8], наличия сжимающих напряжений и заданных показателей физико-механических свойств в поверхностном слое [8-14] обосновывается высокая эксплуатационная надежность деталей при их циклическом и статическом нагружениях, износе, тепловом

воздействии и т.д. [15-18]. Однако следует заметить, что по отдельным деталям, особенно на поверхности которых одновременно присутствует разнообразие по чистоте, структуре и свойствам, необходимы специальные технические и технологические решения, направленные на достижение высоких показателей долговечности и надежности изделий. В литературе отсутствует информация о результативности применения дробенаклепа для повышения циклической долговечности длинномерных стальных деталей в массовом их производстве.

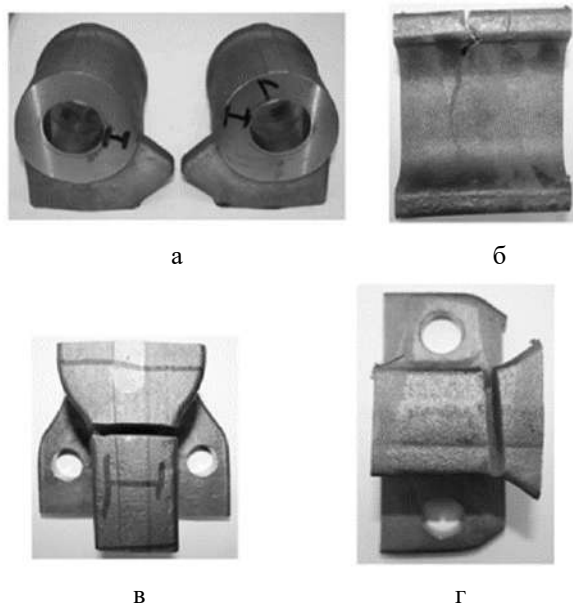


Рис. 1. Характерные места разрушения балки передней оси из-за поверхностных дефектов: а – в районе головки; б – по тавровому сечению; в, г – в районе подрессорной площадки

Fig. 1. Characteristic points of destruction of the front axle beam due to surface defects: a is in the area of the head; б is along the T-section; в, г are in the area of the spring pad

Поэтому первоочередной задачей для деталей является нейтрализация концентраторов напряжений, присутствующих на поверхности, и придание благоприятного сочетания структуры и свойств металла в основе изделия. Цель работы – разработка технологических решений по повышению циклической долговечности длинномерных стальных деталей машин.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования являлись балки передней оси (БПО) автомобиля КАМАЗ, изготовленные из стали 45Х следующего химического состава: углерод – 0,46%, хром – 0,99%, марганец – 0,7%, кремний – 0,23%, никель – 0,03%, медь – 0,04%, сера – 0,027% и фосфор – 0,01%.

Химический состав металла деталей определялся на эмиссионном спектрометре «SPECTROMAX».

Микроструктурный анализ выполнялся на микроскопах «Неофот – 21» и «IM – 7200» с программным обеспечением «Тиксомет». Измерение твердости проводилось на приборе ТР 5004 при использовании шарика $\varnothing 5$ мм и нагрузки 750 кгс. В результате визуального и магнитно-люминесцентного контроля выявляли поверхностные дефекты на деталях и полуфабрикатах. Геометрическая точность деталей определялась при измерительном контроле с использованием специальных приспособлений и устройств. Термическая обработка поковок выполнялась в производственных условиях в проходных печах с газовым обогревом. На каждой подвеске в вертикальном положении располагались по четыре поковки (рис. 2). Дробеобработка поковки осуществлялась в агрегате фирмы «Berget» дробью ДСЛУ-2.2 (ГОСТ 11964-81).

В процессах механической обработки оценивались стойкость сверл $\varnothing 35$ мм со сменными многогранными пластинами из твердого сплава при сверлении отверстий под крепеж и торцевых фрез $\varnothing 125$ мм при фрезеровании подрессорных площадок. Параметры резания: глубина резания 3 мм; скорость резания 235 м/мин и подача 0,21 мм/об при сверлении и 0,28 мм/зуб при фрезеровании.

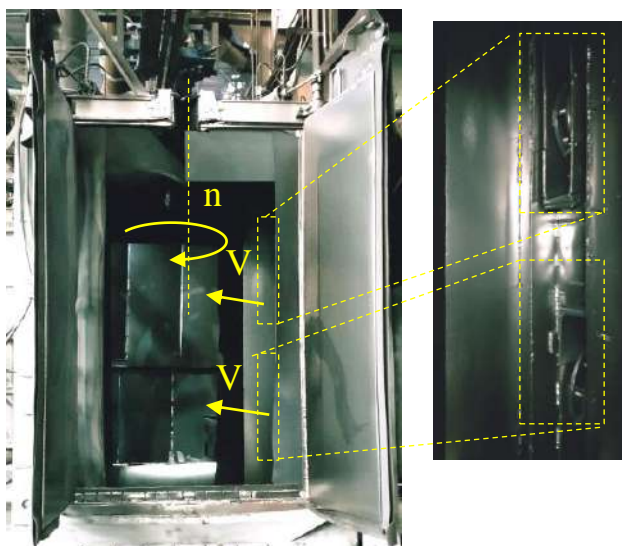
О циклической долговечности балок передней оси судили по результатам испытаний деталей на гидравлическом стенде со свободно установленными цилиндрами-домкратами PZA (Германия), оснащенном прибором ТКА-ПКМ модель 60 с диапазоном измерений от 80 до 106 кПа и гигрометром психрометрическим ВИТ-2 для измерений температуры, влажности и давления окружающей среды.

Результаты исследования и их обсуждение

В конструкции передней оси автомобиля наиболее нагруженной деталью является балка. В качестве полуфабриката для изготовления детали используют поковку, полученную с применением поперечно-клиновой прокатки и штамповки заготовок при температуре 1150-1240°C. После термической обработки и последующей дробеочистки поковки по отдельным участкам подвергают механической обработке: фрезерованию по подрессорным площадкам и сверлению отверстий под крепеж и в бобышках для установки шкворней. В таком состоянии деталь используют в сборочном узле – передней оси автомобиля. В процессе эксплуатации балка испытывает изгиб в различных плоскостях, кручение и ударные нагрузки, возникающие при прямолинейном и динамическом движении, заносе и торможении автомобиля. Для достижения на деталях высокого уровня свойств (более 1 млн циклов нагружений) необходимо решение комплексной задачи, направленной на гарантированное качество очистки поковок от окалины, нейтрализацию поверхностных дефектов и обезуглероженного слоя и создание сжимающих напряжений в поверхностном слое [5]. Эффективным способом повышения циклической долговечности балок передней оси является их поверхностное упрочнение в результате дробеобработки [7].



а



б

в

Рис. 2. Балки на подвеске (а), камера агрегата «Berger» дробенаклепа (б), роторы дробеметов и расположение турбин (в)

Fig. 2. The beams on the suspension (а), the chamber of the Berger shot blasting machine (б), the rotors of the shot blasting machines and the layout of the turbines (в)

В работе разработан, обоснован и впоследствии внедрен технологический процесс производства высокоустойчивых к циклическим нагрузкам балок передней оси, который включает в себя следующие стадии:

- горячая пластическая деформация (поперечно-клиноватая прокатка и последующая объемная штамповка);

- термическая обработка поковок (закалка при 860°C в 10%-м водном растворе Na_2CO_3 , отпуск при температуре 580°C и охлаждение потоком воздуха);

- очистка от окалины поковок дробью ДСЛУ-2.2 в течение 8 мин;

- визуальный и измерительный контроль поковок на наличие поверхностных дефектов и их геометрическую точность;

- правка изгибом (для поковок, имеющих запрещенное коробление);

- магнитно-люминесцентный контроль на наличие поверхностных и подповерхностных дефектов;

- наклеп поверхности поковок дробью ДСЛУ-2.2 в течение 20 мин в агрегате «Berger» (см. рис. 2) и контроль степени наклепа;

- контроль качества поковок на соответствие требованиям ЧТД и КД.

Дробеобработка отштампованных поковок в течение 8 мин позволяет очистить их от окалины, но все же сохраняет на поверхности некоторые дефекты, которые в итоге оказывают отрицательное влияние на циклическую долговечность детали. К таковым относится обезуглероженный слой, складки металла в зоне обрезки облоя, заштампованная окалина и другие дефекты (см. рис. 1). По результатам стендовых испытаний установлено, что эти дефекты снижают долговечность деталей до 700 тыс. циклов и менее.

Неизбежным спутником поверхностного слоя является присутствие обезуглероженного слоя металла (рис. 3). Этот дефект наследуется как от используемого проката, так и приобретает в результате тепловых методов обработки – горячей пластической деформации металлозаготовок и термического улучшения поковок. Такое структурное состояние снижает твердость поверхностного слоя (рис. 4) и уменьшает усталостную прочность изделий.

Несмотря на нейтрализацию обезуглероженного слоя и других поверхностных дефектов путем дробеобработки (см. рис. 4), циклическая долговечность таких деталей все же не достигает максимального уровня, заложенного в материале – сталь 45Х. Об этом свидетельствуют разрушения деталей в процессе циклических испытаний, которые проходят в районе отверстия под шкворень на бобышке (рис. 5). Идентичный характер разрушений сохраняется как по левому, так и по правому отверстию детали.

В табл. 1 представлены сведения о циклической стойкости и показатели обрабатываемости балок передней оси, прошедшие дробенаклеп и имеющие различную твердость металла основы детали. Все поковки деталей подвергались закалке при 860°C в 10%-м водном растворе Na_2CO_3 и далее проходили высокий отпуск в интервале температур $560\text{--}620^{\circ}\text{C}$ для получения заданной твердости. После термической обработки на всех поковках микроструктура металла соответствовала сорбиту отпуска.

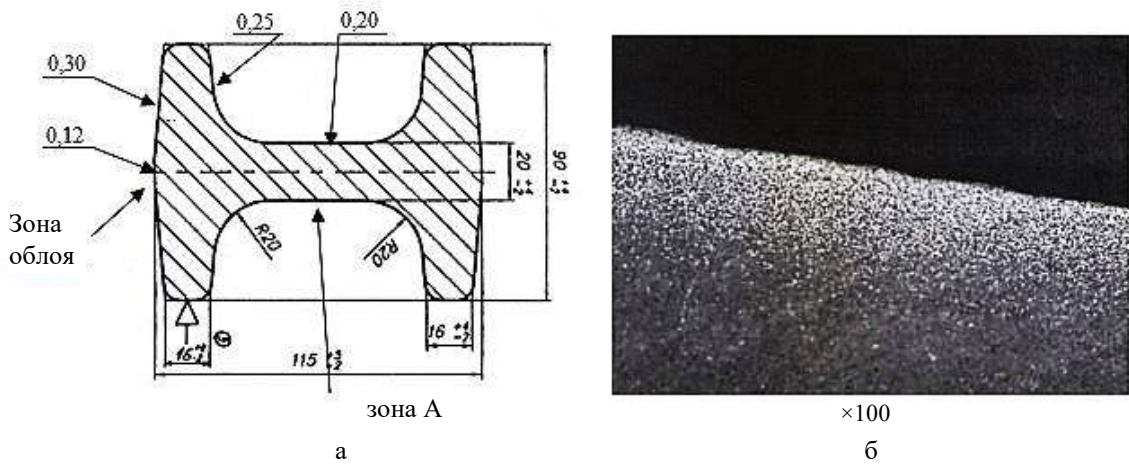


Рис. 3. Глубина обезуглероженного слоя по контуру таврового сечения центральной части балки передней оси (а) и микроструктура стали с обезуглероженным слоем на поверхности в зоне «А» (б)
 Fig. 3. Depth of the decarbonized layer along the contour of the T-section in the central part of the front axle beam (a) and the microstructure of steel with a decarbonized layer on the surface in zone A (б)

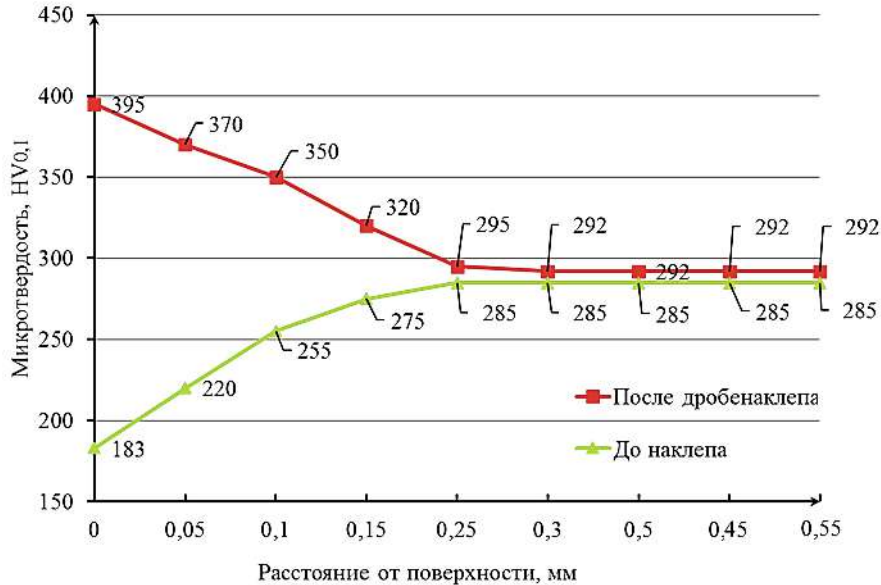


Рис. 4. Распределение микротвердости по глубине обезуглероженного слоя на поковках без дробеобработки и после дробенаклепа в течение 20 мин
 Fig. 4. Distribution of microhardness along the depth of the the decarbonized layer on the forgings without shot blasting and after 20 minutes of shot blasting

Таблица 1. Циклическая стойкость балки передней оси и показатели работоспособности (стойкости) режущего инструмента при механической обработке поковок
 Table 1. Syclic durability of the front axle beam and performance (durability) of the cutting tool in the machining of the forgings

Твердость НВ	265	269	285	293	302	311	321
Циклическая стойкость, тыс. циклов	945	1050	1105,3	1234,9	1502,3	1507,4	1506,8
Путь резания при сверлении, м	3228,1	3016,4	2910,6	2857,7	2804,6	2744,3	2598,2
Путь резания при фрезеровании, м	5174,9	4931,1	4695,1	4551,5	4415,4	4334,2	4147,4

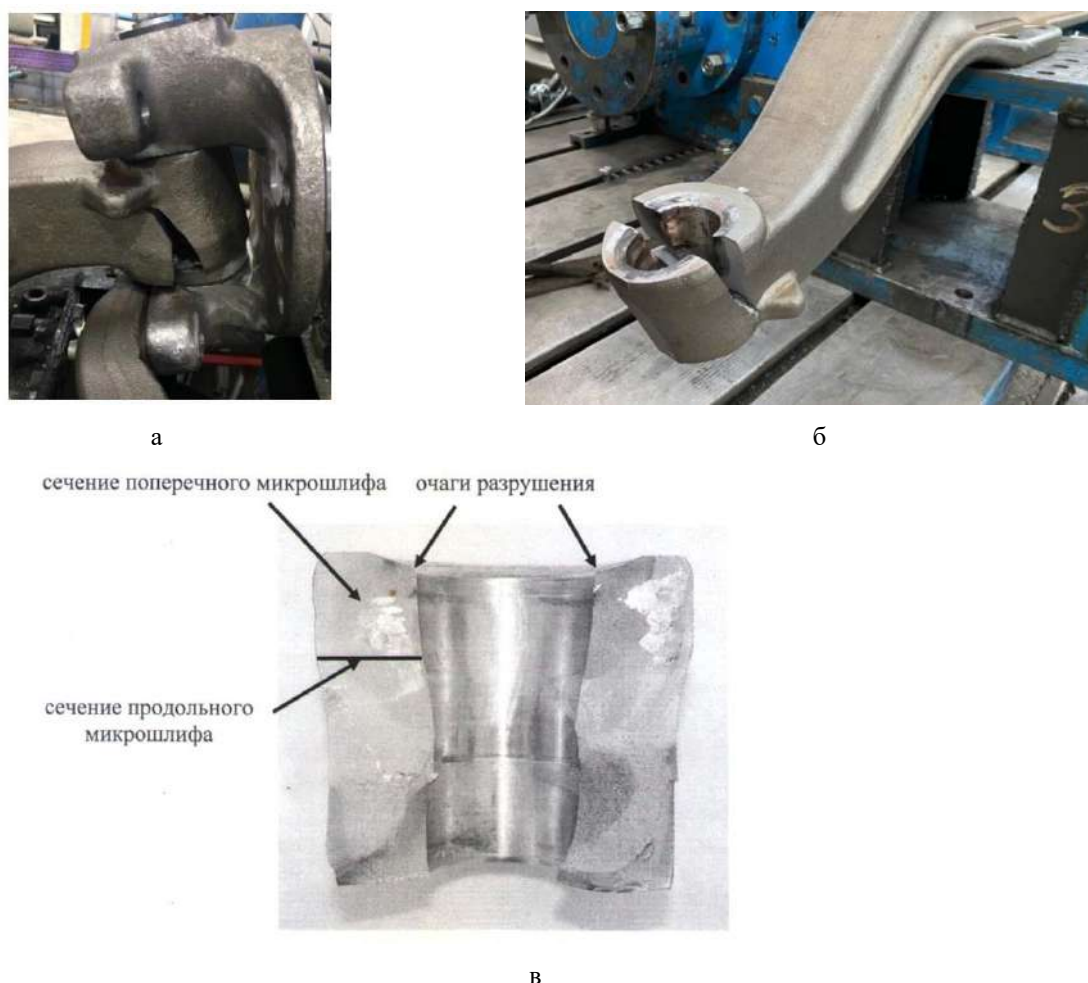


Рис. 5. Места разрушений балки после испытаний переднего моста: а – узел в сборе; б – разрушенная балка передней оси; в – фрактография усталостного излома

Fig. 5. Points of destruction of the beam after testing the front axle: а is an assembly unit; б is a destroyed front axle beam; в is fractography of fatigue fracture

Последующая дробеобработка балок в течение 20 мин обеспечивает повышение значений микротвердости поверхности до величины 400 НВ. Наклеп поверхностного слоя сохраняется до глубины 0,25 мм, что формирует в слое сжимающие напряжения, предотвращающие разрушение балки в местах концентраторов на необрабатываемых поверхностях балки. Степень наклепа зависит от фракционного состава дробы, настройки дробеметов, скорости вращения балок на подвесе, степени предварительной очистки поверхности балки от следов окалины и других переменных технологических факторов.

Исследованиями установлено, что в зоне разрушения всех деталей отсутствуют дефекты металлического характера, а загрязненность стали неметаллическими включениями не превышает 2 балла. Во всех случаях начало зарождения трещин усталости проходило с поверхности конусного отверстия (см. рис. 5). В процессе механической обработки поковок была оценена стойкость (работоспособность) режущего инструмента при сверлении и фрезеровании. В качестве критерия стойкости сверл и фрез бы принят путь резания, обес-

печивающий заданную степень точности размеров от принятой базы отсчета для детали. Выявлено, что с повышением твердости металла основы поковок снижается стойкость режущего инструмента и повышается циклическая долговечность деталей (см. табл. 1). Следует отметить, что значительное повышение твердости материала поковки ограничивается ростом расходов на инструмент. Так, при повышении твердости поковки с 255 до 321 НВ путь резания при сверлении снижается на 19,5% и при фрезеровании на 19,9% (см. табл. 1), что повышает себестоимость изготовления поковок. Как показали результаты исследований балок, благоприятное сочетание циклической долговечности деталей и стойкости режущего инструмента при механической обработке поковок приходится на твердость 269-311 НВ.

Для обеспечения контроля степени наклепа изготовлено специальное контрольное приспособление в виде балки с расположенными по ее длине 10-ю пластинами Альмена размерами – 76,2×19×1,3 мм [19]. Пластины изготовлены из легированной стали 70ГС, имеют твердость 44-50 HRC и установлены в кон-

структивно опасных местах и местах разрушений балки. Крепление пластинок к балке осуществляется винтами или болтами с использованием прижимных шайб.

В работе выполнен тестовый эксперимент, заключающийся в дробенаклепе балки с пластинами в камере при выполнении заданных условий обработки: использование свежей дробы без наличия колотой фракции, скорость поворота подвески 8 м/мин, длительность дробенаклепа в течение 20 мин в агрегате «Berger» после его наладки. Данные парных измерений прогиба и микротвердости приведены в табл. 2.

Полученные результаты показали, что о величине дробенаклепа можно судить по величине прогиба 3-х ключевых пластин Альмена (см. табл. 2). Ключевыми выбраны те точки, прогибы в которых минимальны, это точки 6, 10 и 12. Точки находятся в средней части балки и в зоне бобышки. Заданные параметры микротвердости поверхности достигаются при прогибе пластин от 4 до 5 мм. Обеспечение регулирования в этих пределах дает возможность стабильного обеспечения наклепа поверхности и значительного повышения циклической долговечности балок передней оси.

Заключение

1. Разработано и реализовано технологическое решение по двухстадийной дробеобработке балок

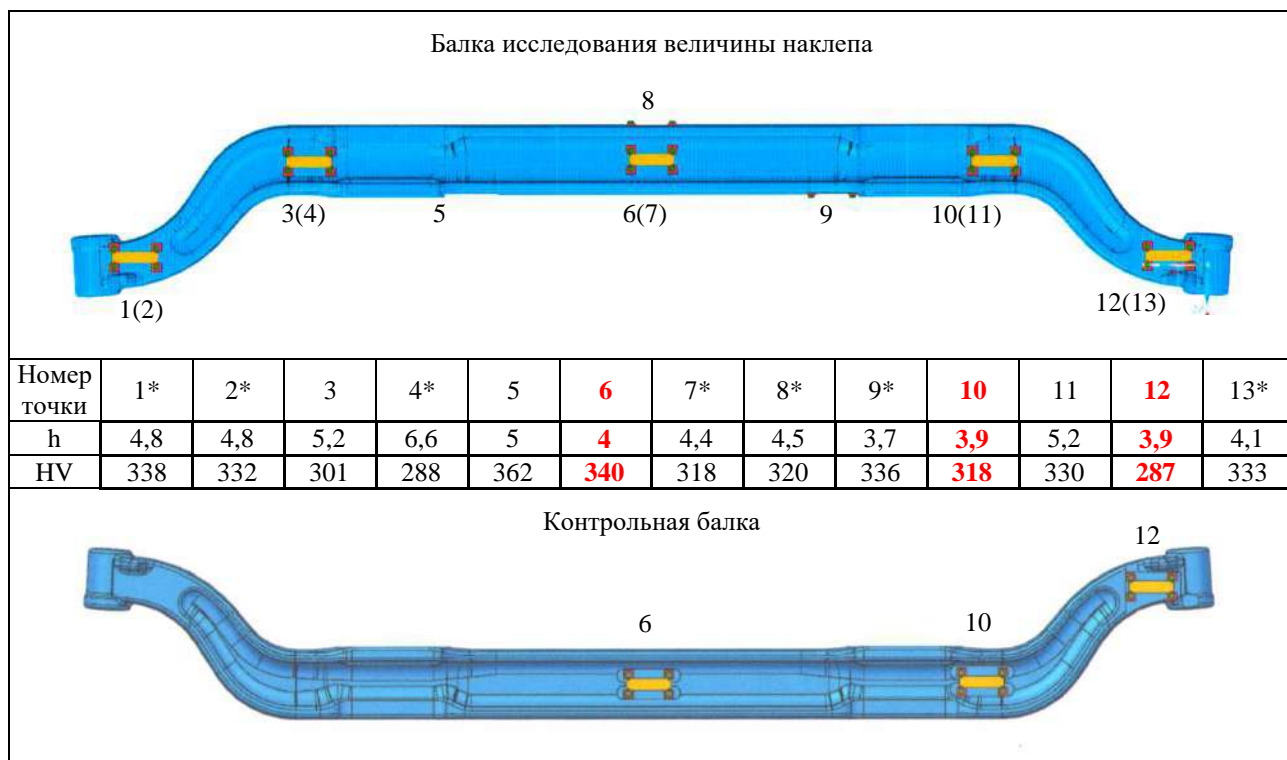
передней оси, позволяющее обеспечить заданный уровень циклической долговечности. Решение включает операции дробеочистки дробью ДСЛУ-2.2 в четырехтурбинном агрегате фирмы «Berger» в течение 8 мин, выполняемой после штамповки и термообработки с минимальным окислением поверхности поковок, а также операции дробенаклепа в течение 20 мин, выполняемой после операции холодной правки и люминисцентного контроля поверхностных дефектов материала поковок.

2. Предложен и внедрен технологический маршрут изготовления балок передней оси автомобиля КАМАЗ с использованием рациональных параметров термической обработки и дробенаклепа поверхности поковок, которые обеспечивают нейтрализацию поверхностных дефектов и обезуглероженного слоя, а также получение твердости металла основы детали в пределах 269-311 НВ. Эти технологические решения обеспечивают получение высокой долговечности деталей при их циклическом нагружении (более 1 млн циклов).

3. При оценке качества деталей необходимо применять визуальный, измерительный и магнитно-люминисцентный контроль. Эффекты дробенаклепа предлагается определять по величине прогиба пластины Альмена. Контроль деталей на твердость проводить на бобышке поковки.

Таблица 2. Расположение и величина контрольных пластин Альмена на поверхности исследовательской и контрольной балки

Table 2. The layout and size of the Almen control strips on the surface of the research and control beams



Примечание. Величина прогиба включает толщину пластины Альмена.
«*» – точки со стабильными условиями дробенаклепа.

Список источников

1. Глинер Р.Е., Астащенко В.И. Введение в технологию поверхностного упрочнения металла. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. 328 с.
2. Effect of N₂ flow rate on microstructure and mechanical properties of PVD CrN_x coatings for tribological application in seawater / Shan L., Wang Y., Li J., Chen J. // *Surface and Coatings Technology*. 2014, vol. 242, iss. 4, pp. 74-82.
3. Totten G. E. *Steel heat treatment: Metallurgy and technologies*. 2nd ed. London: Taylor & Francis, 2007. 832 p.
4. Фундаментальные основы технологического обеспечения и повышения надежности изделий машиностроения / Суслов А.Г., Фёдоров В.П., Горленко О.А. и др.; под ред. А.Г. Суслова. М.: Инновационное машиностроение, 2022. 552 с.
5. Зубарев Ю.М. Технологическое обеспечение надежности эксплуатации машин. 2-е изд., стер. СПб.: Лань, 2022. 320 с.
6. Колобов А.Б. Прочностная надежность и долговечность деталей машин и конструкций. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2020. 192 с.
7. Технологические методы повышения качества изделий / Крупеня Е.Ю., Лебедев В.А., Болдырев А.И. и др. Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет, 2020. 129 с.
8. Зинченко В.М. Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 303 с.
9. Колобов А.Б. Прочностная надежность и долговечность деталей машин и конструкций. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2020. 192 с.
10. Перспективные методы поверхностной обработки деталей машин / Глазунов В.А. и др.; отв. ред. Г.В. Москвитин; Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук. М.: Ленанд, 2018. 447 с.
11. Bertóti I. Characterization of nitride coatings by XPS // *Surface and Coatings Technology*. 2002, vol. 151-152, iss. 1, pp. 194-203.
12. Formation of nano-laminated structures in a dry sliding wear-induced layer under different wear mechanisms of 20CrNi2Mo steel / Yin C., Liang Y., Jiang Y. et al // *Applied Surface Science*. 2017, vol. 423, pp. 305-313.
13. Дробеударное упрочнение деталей машин / Матлин М.М., Лебский С.Л. и др. М.: Машиностроение, 2008. 230 с.
14. Упрочнение длинномерных стальных изделий методом дробеструйной обработки / В.И. Астащенко, Г.Ф. Мухаметзянова, Р.Е. Орлянский, И.Ж. Харисов // *Черные металлы*. 2023. №1. С. 26-31.
15. Benlahreche F.Z., Nouicer E. Improvement of surface properties of low carbon steel by nitriding treatment // *Acta Phys. Pol. A*. 2017, vol. 131, pp. 20-23.
16. Морозова Е.А., Морозов А.П., Муратов В.С. Влияние термической и поверхностной пластической обработок углеродистой стали на чувствительность к концентраторам напряжений при циклическом нагружении // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2020. №7. С. 328-332.
17. Effect of retained austenite stabilized via quench and partitioning on the strain hardening of martensitic steels / De Moor E., Lacroix S., Clarke A.J. et al. // *Metallurgical and Materials Transactions*. 2008, vol. 39A, pp. 2586-2595.
18. Рудницкий Н.М., Казанченко Т.А. Влияние твердости, полученной при закалке стали 45 на выносливость после высокого отпуска // *Труды НАМИ*. 1966. Вып. 85. С. 15-26.
19. Патент на полезную модель 217098 РФ. Устройство для измерения интенсивности дробенаклепа поверхности металлоизделий / Астащенко В.И., Мухаметзянова Г.Ф., Харисов И.Ж., Махонин В.В., Карнилов А.Ю., Салыхов И.Ф., Орлянский В.Е., Пешков А.Н.; заявитель Публичное акционерное общество «КамАЗ» № 2022130603, заявл. 25.11.2022; опубл. 16.03.2023. 12 с.

References

1. Gliner R.E., Astashchenko V.I. *Vvedenie v tekhnologiyu poverkhnostnogo uprochneniya metalla* [Introduction to the technology of surface hardening of metal]. Moscow; Vologda: Infra-Inzheneriya, 2022, 328 p. (In Russ.)
2. Shan L., Wang Y., Li J., Chen J. Effect of N₂ flow rate on microstructure and mechanical properties of PVD CrN_x coatings for tribological application in seawater. *Surface and Coatings Technology*. 2014;242(4):74-82.
3. Totten G.E. *Steel heat treatment: Metallurgy and technologies*. 2nd ed. London: Taylor & Francis, 2007, 832 p.
4. Suslov A.G., Fedorov V.P., Gorlenko O.A. et al. *Fundamentalnye osnovy tekhnologicheskogo obespecheniya i povysheniya nadezhnosti izdelii mashinostroeniya* [Fundamentals of technological support and reliability improvement of machine building products]. Moscow: Innovatsionnoe mashinostroenie, 2022, 552 p. (In Russ.)
5. Zubarev Yu.M. *Tekhnologicheskoe obespechenie nadezhnosti ekspluatatsii mashin* [Technological support of reliability of machine operation]. Saint Petersburg: Lan, 2022, 320 p. (In Russ.)
6. Kolobov A.B. *Prochnostnaya nadezhnost i dolgovечnost detalei mashin i konstruktssii* [Strength reliability and durability of machine parts and structures]. Moscow; Vologda: Infra-Inzheneriya, 2020, 192 p. (In Russ.)
7. Krupenya E.Yu., Lebedev V.A., Boldyrev A.I. et al. *Tekhnologicheskie metody povysheniya kachestva izdelii* [Technological methods for improving the quality of products]. Rostov-on-Don: Don State Technical University, 2020, 129 p. (In Russ.)
8. Zinchenko V.M. *Inzheneriya poverkhnosti zubchatykh koles metodami khimiko-termicheskoi obrabotki* [En-

- gineering of a gear surface by methods of chemical and thermal treatment]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2001, 303 p. (In Russ.)
9. Kolobov A.B. *Prochnostnaya nadezhnost i dolgovechnost detalei mashin i konstruksii* [Strength reliability and durability of machine parts and structures]. Moscow; Vologda: Infra- Inzheneriya, 2020, 192 p. (In Russ.)
 10. Glazunov V.A. et al. *Perspektivnye metody poverkhnostnoi obrabotki detalei mashin* [Promising methods of surface treatment of machine parts]. Blagonravov Institute of Machine Science of the Russian Academy of Sciences. Moscow: LENAND, 2018, 447 p. (In Russ.)
 11. Bertóti I. Characterization of nitride coatings by XPS. *Surface and Coatings Technology*. 2002;151-152(1):194-203.
 12. Yin C., Liang Y., Jiang Y. et al. Formation of nanolaminated structures in a dry sliding wear-induced layer under different wear mechanisms of 20CrNi2Mo steel. *Applied Surface Science*. 2017;423:305-313.
 13. Matlin M.M., Lebsky S.L. et al. *Drobeudarnoe uprochnenie detalei mashin* [Shot blast hardening of machine parts]. Moscow: Mashinostroenie, 2008, 230 p. (In Russ.)
 14. Astashchenko V.I., Mukhametzyanova G.F., Orlyansky R.E., Kharisov I.Zh. Hardening of long-length steel products by shot blasting. *Chernye metally* [Ferrous Metals]. 2023;(1):26-31. (In Russ.)
 15. Benlahreche F.Z., Nouicer E. Improvement of surface properties of low carbon steel by nitriding treatment. *Acta Phys. Pol. A*. 2017;131:20-23.
 16. Morozova E.A., Morozov A.P., Muratov V.S. Influence of thermal treatment and surface hardening of carbon steel on sensitivity to stress concentrators under cyclic loading. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii* [Blank Production in Mechanical Engineering]. 2020;(7):328-332. (In Russ.)
 17. De Moor E., Lacroix S., Clarke A. J. et al. Effect of retained austenite stabilized via quench and partitioning on the strain hardening of martensitic steels. *Metallurgical and Materials Transactions*. 2008;39A:2586-2595.
 18. Rudnitsky N.M., Kazanchenko T.A. Influence of hardness obtained by hardening steel 45 on the fatigue limit after high tempering. *Trudy NAMI* [Proceedings of NAMI (Automobile and Engine Research Institute)]. 1966;(85):15-26. (In Russ.)
 19. Astashchenko V.I., Mukhametzyanova G.F., Kharisov I.Zh., Makhonin V.V., Karnilov A.Yu., Sal'yakhov I.F., Orlyansky V.E., Peshkov A.N. *Ustroistvo dlya izmereniya intensivnosti drobenaklepa poverkhnosti metalloizdelii* [Device for measuring the rate of shot blasting of the metalware surface]. Utility model patent, no. 217098, 2023.

Поступила 29.06.2023; принята к публикации 22.09.2023; опубликована 28.03.2024
Submitted 29/06/2023; revised 22/09/2023; published 28/03/2024

Кленько Сергей Викторович – директор Кузнечного завода ПАО «КамАЗ», Набережные Челны, Россия.
Email: fashutdinovai@gmail.com.

Асташченко Владимир Иванович – доктор технических наук, профессор, Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета, Набережные Челны, Россия.
Email: astvi-52@mail.ru. Scopus Author ID: 6507110140

Сафаров Дамир Тамасович – кандидат технических наук, доцент, Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета, Набережные Челны, Россия.
Email: safarov-dt@mail.ru. ORCID 0000-0002-8297-4524. Scopus Author ID: 6603409746

Харисов Ильсур Жавдатович – начальник конструкторского бюро Кузнечного завода ПАО «КамАЗ», Набережные Челны, Россия. Email: HarisovIZ@kamaz.ru.

Орлянский Владимир Евгеньевич – начальник отдела агрегатов шасси научно-технического центра ПАО «КамАЗ», Набережные Челны, Россия. Email: Orlyanskiy@kamaz.ru.

Sergey V. Klenko – Director, Forging Plant, PJSC KAMAZ, Naberezhnye Chelny, Russia.
Email: fashutdinovai@gmail.com.

Vladimir I. Astashchenko – DrSc (Eng.), Professor, Naberezhnye Chelny Institute (branch) of Kazan (Volga Region) Federal University, Naberezhnye Chelny, Russia.
Email: astvi-52@mail.ru. Scopus Author ID: 6507110140

Damir T. Safarov – PhD (Eng.), Associate Professor, Naberezhnye Chelny Institute (branch) of Kazan (Volga Region) Federal University, Naberezhnye Chelny, Russia.
Email: safarov-dt@mail.ru. ORCID 0000-0002-8297-4524. Scopus Author ID: 6603409746

Ilsur Zh. Kharisov – Head of the Design Department, Forging Plant, PJSC KAMAZ, Naberezhnye Chelny, Russia. Email: HarisovIZ@kamaz.ru.

Vladimir E. Orlyansky – Head of the Chassis Assembly Department of the Research and Development Center PJSC KAMAZ, Naberezhnye Chelny, Russia. Email: Orlyanskiy@kamaz.ru.

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ. СТАНДАРТИЗАЦИЯ. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

PRODUCT QUALITY MANAGEMENT. STANDARDIZATION. INDUSTRIAL MANAGEMENT

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 006.029 (004.89)
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-1-107-113



ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПОИСКА НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОСНОВНЫХ ПОДХОДОВ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Побединский В.В.¹, Полякова М.А.², Казанцева Т.В.³, Казанцева Н.К.³, Иовлев Г.А.¹

¹ Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия

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

³ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Настоящее время характеризуется революцией в информационных технологиях, и человечество переживает период «информационного взрыва», когда нарастание массы информации происходит лавинообразно. Возникла глобальная проблема обработки информации, которая имеет свои специфические особенности в области стандартизации, в частности поиск необходимых нормативных документов, численность которых может составлять сотни и даже миллионы файлов в различных базах данных. Используемые для поиска в известных системах ключевые слова не дают строго точной идентификации документа и его полного соответствия требованиям запроса, так как с точки зрения теории нечетких множеств они несут свойство неопределенности. В данном случае будет более корректно для разработки системы поиска использовать положения нечеткой логики как одной из концепций интеллектуальных систем. Несмотря на массовое использование таких систем в различных областях, в поисковых системах нормативных документов они не применялись, поэтому проблема эффективного поиска документов остается в полной мере нерешенной, что говорит об актуальности проведения дополнительных исследований. **Цель работы.** Создание интеллектуальной системы поиска нормативных документов на основе положений нечеткой логики, при которой решались следующие задачи: 1) обоснование теоретического подхода для решения задачи интеллектуального поиска документов; 2) постановка задачи в содержательном виде; 3) разработка нечетких функций принадлежности входных и выходных переменных; 4) разработка базы правил нечеткой продукции; 5) реализация нечеткой системы в среде MATLAB; 6) разработка подпрограммы оценки соответствия запросу в среде Simulink. **Используемые методы.** Теория алгоритмов и программ, теория нечетких множеств, теория нечеткой логики, система MATLAB. **Новизна.** Впервые предложен алгоритм и система поиска нормативных документов, основанная на использовании основных положений нечеткой логики. **Результат.** Предложена реализованная в программной среде MATLAB система поиска нормативных документов с использованием нечеткой логики. **Практическая значимость.** Алгоритм и его программная реализация в среде Simulink являются в достаточной мере универсальными и могут использоваться для поиска нормативных документов любого типа.

Ключевые слова: нормативный документ, система поиска, теория нечетких множеств, нечеткая продукция, нечеткая система, запрос

© Побединский В.В., Полякова М.А., Казанцева Т.В., Казанцева Н.К., Иовлев Г.А., 2024

Для цитирования

Интеллектуальная система поиска нормативных документов с использованием основных подходов нечеткой логики / Побединский В.В., Полякова М.А., Казанцева Т.В., Казанцева Н.К., Иовлев Г.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №1. С. 107-113. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-107-113>



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

AN INTELLIGENT SYSTEM BASED ON MAIN APPROACHES OF FUZZY LOGIC FOR SEARCHING FOR REGULATORY DOCUMENTS

Pobedinskiy V.V.¹, Polyakova M.A.², Kazantseva T.V.³, Kazantseva N.K.³, Iovlev G.A.¹

¹ Ural State Agrarian University, Yekaterinburg, Russia

² Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

³ Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The present time is characterized by a revolution in information technology and humanity is experiencing a period of the "information explosion", when the mass of information increases in an avalanche. There is a global problem of processing information, which has its own specific features in the field of standardization, in particular, the search for necessary regulatory documents, whose number can amount to hundreds or even millions of files in various databases. Keywords used for searching in well-known systems do not provide strictly accurate identification of the document and its full compliance with the requirements of the query, because from the point of view of fuzzy set theory they carry the property of uncertainty and in this case, it would be more correct to use the provisions of fuzzy logic as one of the concepts of intelligent systems for the development of a search system. Despite the widespread use of such systems in various fields, they have not been used in terms of search engines for regulatory documents, so the problem of the efficient document search remains fully unresolved, which indicates the relevance of additional research. **Objectives.** The research aims at creating an intelligent system based on fuzzy logic to search for regulatory documents. The following tasks are to be solved: 1) substantiation of a theoretical approach to solving the problem of the intelligent document search; 2) formulation of the problem in a meaningful way; 3) development of fuzzy functions for the membership of input and output variables; 4) development of a database of rules for fuzzy products; 5) implementation of a fuzzy system in the MATLAB environment; 6) development of a query compliance assessment subroutine in the Simulink environment. **Methods Applied.** Theory of algorithms and programs, fuzzy set theory, fuzzy logic theory, and the MATLAB system. **Originality.** This paper originally proposes an algorithm and a fuzzy logic system for searching for regulatory documents. **Result.** The paper describes a proposed fuzzy logic system implemented in the MATLAB software environment for searching for regulatory documents. **Practical Relevance.** The algorithm and its software implementation in Simulink are quite versatile and can be used to search for regulatory documents of any type.

Keywords: regulatory document, search system, fuzzy set theory, fuzzy product, fuzzy system, query

For citation

Pobedinskiy V.V., Polyakova M.A., Kazantseva T.V., Kazantseva N.K., Iovlev G.A. An Intelligent System Based on Main Approaches of Fuzzy Logic for Searching for Regulatory Documents. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 1, pp. 107-113. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-107-113>

Введение

Настоящее время характеризуется революцией в информационных технологиях, и человечество переживает период «информационного взрыва», когда нарастание массы информации происходит лавинообразно. Так, в 2022 году объемы всех данных, накопленных человечеством, составили примерно 97 зеттабайт (1 зеттабайт = миллиард терабайт), а к 2025 году это число возрастет до 180 зеттабайт. Таким образом, ежегодно объем информации в мире увеличивается примерно в пять раз [1, 2]. Такая тенденция вызвала огромную проблему хранения информации, поэтому на сегодня созданы мощные дата-центры, которые позволяют хранить эксабайты (миллионы терабайт) информации. Но в науке и производстве появилась и другая проблема: требуется не только хранение и даже не первичная обработка,

например сортировка, но и выполнение определенного анализа информации, что многократно усложняет проблему. Решить такую масштабную проблему без привлечения современных информационных технологий невозможно, поэтому, например, ключевая тема международной конференции в Минске «Развитие информатизации и государственной системы научнотехнической информации» (РИНТИ-2023) была посвящена использованию методов искусственного интеллекта для решения указанных проблем [2].

Свои специфические особенности обработки информации имеются в области стандартизации, в частности поиск необходимых нормативных документов, численность которых может составлять сотни и даже миллионы файлов в различных базах данных. Поскольку проблема общеизвестна, то появилось большое количество поисковых систем, которые имеют свои назначения, особенности, достоинства и недо-

статки. Кроме классификации по номерам, параметрами поиска в известных системах являются ключевые слова [3-6]. Но они не дают строго точной идентификации документа и его полного соответствия требованиям запроса. Следовательно, с точки зрения теории нечетких множеств [7] они несут свойство неопределенности, и в данном случае будет более корректно для разработки системы поиска использовать положения нечеткой логики, как одной из концепций интеллектуальных систем [7-12]. Несмотря на массовое использование таких систем в различных областях, в части поисковых систем нормативных документов они не применялись, поэтому проблема эффективного поиска документов остается в полной мере нерешенной, что говорит об актуальности проведения дополнительных исследований.

Таким образом, целью работы было создание интеллектуальной системы с использованием нечеткой логики для поиска нормативных документов из различных баз данных.

Для достижения цели решались следующие задачи:

- 1) обоснование теоретического подхода для решения задачи интеллектуального поиска документов;
- 2) постановка задачи в содержательном виде;
- 3) разработка нечетких функций принадлежности входных и выходной переменных;
- 4) разработка базы правил нечеткой продукции;
- 5) реализация нечеткой системы в среде MATLAB;
- 6) разработка подпрограммы оценки соответствия запросу в среде Simulink.

Материалы и методы исследования

Для решения поставленных задач в работе использовались теория алгоритмов и программ, теория нечетких множеств (ТНМ), нечеткая логика. Программная реализация предложенного алгоритма была выполнена в среде системы компьютерной математики и моделирования MATLAB+FuzzyLogicDesigner. Подпрограмма оценки соответствия документа запросу для использования в основном алгоритме поиска разработана в среде Simulink [13].

Полученные результаты и их обсуждение

Обоснование теоретического подхода к решению задачи интеллектуального поиска документов. Рассматривая задачу поиска, нужно учесть, что нормативные документы имеют нумерацию, следовательно определенную структуру. Например, они структурированы на стандарты, нормы и правила, технические условия, руководства, рекомендации, инструкции, положения, а также классифицируются по ведомственной принадлежности, уровню применения, области действия, типу и другие категории. С одной стороны, это значительно снижает трудоемкость поиска, так как с точки зрения теории алгоритмов поисковая система может быть организована по динамическому алгоритму, то есть с разделением на

подзадачи и для упрощения в виде линейного алгоритма. Но, с другой стороны, возникает проблема соответствия заданным ключевым словам также огромного количества документов, содержащих эти слова в другом контексте. Неопределенность имеется и в количестве слов, достаточности такого набора слов, количественном содержании в документах, соотношении количества повторений между словами. Следовательно, ключевые слова в данном случае несут свойство неопределенности, а для формализации этого понятия и свойств используется теория нечетких множеств. Для решения широкого круга конкретных задач используется практическое приложение ТНМ – нечеткая логика. Таким образом, можно определить, что для решения задачи следует использовать алгоритм динамического типа, чтобы, поэтапно выполняя поиск, значительно сократить объемы в дальнейшем анализируемых документов, алгоритм предпочтительно линейный, а на заключительном или одном из заключительных этапов предусмотреть подсистему интеллектуального поиска на основе нечеткой логики.

Содержательная постановка задачи. Содержательная постановка задачи предназначена для неформального описания физического смысла, назначения, действий, параметров задачи, что позволяет в дальнейшем выполнить корректные математическое описание и алгоритм решения. Так, в рассматриваемой системе поиск должен выполняться в несколько этапов, спускаясь по заданным уровням иерархической классификации документов. Но возможны случаи, когда признаки поиска на первых этапах могут быть не заданы. Это увеличивает трудоемкость поиска на других этапах. Одним из вариантов может быть поиск по разделу «ключевые слова», который является обязательным для нормативных документов. Следует сказать, что, как правило, пользователь располагает только ключевыми словами, которые и будет задавать. Следовательно, основным параметром задачи поиска будет набор ключевых слов. Следует определить значение и диапазон изменения такого параметра в процессе поиска. Очевидно, это будет число повторений ключевых слов в тексте документа. Но не абсолютное значение, а относительное, например процентное содержание от общего количества слов в документе [14].

Использование одного параметра не дает достаточно точной идентификации, так как повториться может много раз одно или два слова, а весь текст не будет соответствовать запросу, поэтому необходимо определить как минимум еще один параметр. Определим его исходя из следующих соображений. В большинстве поисковых систем предусмотрена функция расширенного поиска, когда задается больше ключевых слов или фраз, поэтому может быть информативен показатель охвата расширенного перечня слов. Очевидно, и этот параметр должен измеряться в процентах от количества слов, но не в тексте документа, а в расширенном списке. Для этого параметра следует определить диапазон изменения количества слов в списке.

Выходной параметр определяется исходя из назначения системы – это должна быть степень соответствия документа параметрам запроса. Наиболее удобно задать его методом шкалирования [7], например по пятибалльной шкале от 0 до 5.

На основании изложенного формируются следующие этапы решения задачи.

Разработка нечетких функций принадлежности. Для разработки нечетких функций принадлежности следует формализовать параметры задачи с использованием лингвистических переменных.

Определение входных переменных. Как было определено выше, первой переменной будет показатель «Повторение ключевых слов» (ПКС),%. В терминах ТНМ и с числовыми параметрами задачи она будет записана следующим образом:

$$\text{ПКС} = \{\text{Мин, М, Ср, Б, Мах}\}, \quad (1)$$

где Мин – минимальное, от 0 до 20; М – малое, от 10 до 40; Ср – среднее, от 30 до 60; Б – большое, от 50 до 80; Мах – максимальное, от 70 до 100.

Вторая входная переменная показывает степень охвата расширенного перечня слов или «Охват перечня слов» (ОПС), %, и записана будет аналогично:

$$\text{ОПС} = \{\text{Мин, М, Ср, Б, Мах}\}, \quad (2)$$

где Мин – минимальное, от 0 до 20; М – малое, от 10 до 40; Ср – среднее, от 30 до 60; Б – большое, от 50 до 80; Мах – максимальное, от 70 до 100.

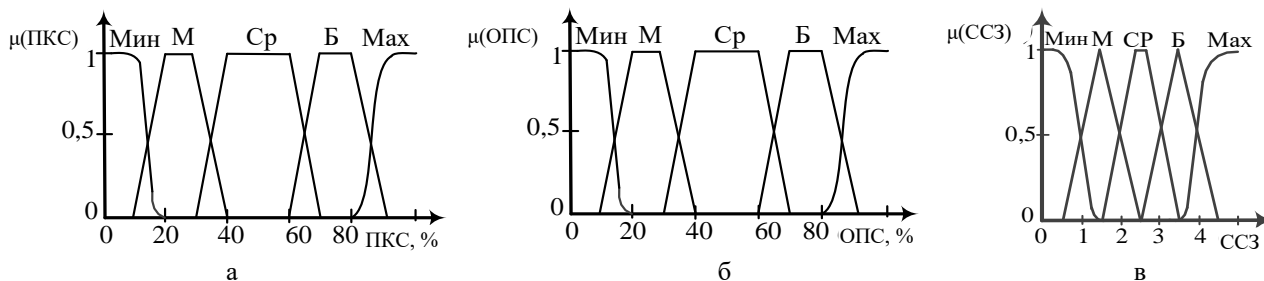


Рис. 1. Переменные задачи интеллектуального поиска нормативных документов: а – «Повторение ключевых слов» (ПКС); б – «Охват перечня слов» (ОПС); в – «Степень соответствия запросу» (ССЗ)

Fig. 1. Variables of the intelligent search for regulatory documents: а is “Keyword repetition” (ПКС); б is “Scope of a list of words” (ОПС); в is “Query relevance” (ССЗ)

Таблица 1. База правил нечеткой продукции
Table 1. The base of fuzzy product rules

Значение ПКС, %	Функция ССЗ при значении ОПС				
	Мин	М	Ср	Б	Мах
Мин	Мин	Мин	М	Ср	Ср
М	Мин	М	Ср	Ср	Ср
Ср	М	М	Ср	Б	Б
Б	М	Ср	Б	Б	Мах
Мах	Ср	Ср	Б	Мах	Мах

Определение выходной переменной. Выходная переменная будет показывать «Степень соответствия запросу» (ССЗ) и ее формула имеет вид

$$\text{ССЗ} = \{\text{Мин, М, Ср, Б, Мах}\}, \quad (3)$$

где Мин – минимальное, от 0 до 1,5; М – малое, от 0,5 до 2,5; Ср – среднее, от 1,5 до 3,5; Б – большое, от 2,5 до 4,5; Мах – максимальное, от 3,5 до 5.

В графическом виде переменные задачи показаны на рис. 1.

Разработка базы правил нечеткой продукции. Для выполнения нечеткого вывода использован наиболее распространенный способ Мамдани, для которого требуется разработать базу правил нечеткой продукции. Правила нечеткой продукции имеют следующий вид:

ЕСЛИ ПКС = «Минимальное» И
ОПС = «Минимальное» ТО ССЗ = «Минимальное».

ЕСЛИ ПКС = «Малое» И
ОПС = «Большое» ТО ССЗ = «Среднее».

Аналогично строятся правила и для других соотношений переменных.

В практике нечеткой логики база правил может быть необязательно полной, включающей все сочетания переменных, но для большей точности для данной задачи база правил разработана в полном объеме и приведена в табл. 1.

Реализация нечеткой системы в среде MATLAB.
 Нечеткая система реализована в среде FuzzyLogicDesigner приложения MATLAB [12]. На рис. 2 приведена последовательность процедур нечеткого вывода и по-

лучения результирующей функции степени соответствия запросу $CC3 = f(\text{ПКС}, \text{ОПС})$. Созданная нечеткая система сохранена в файле Standart.fis.

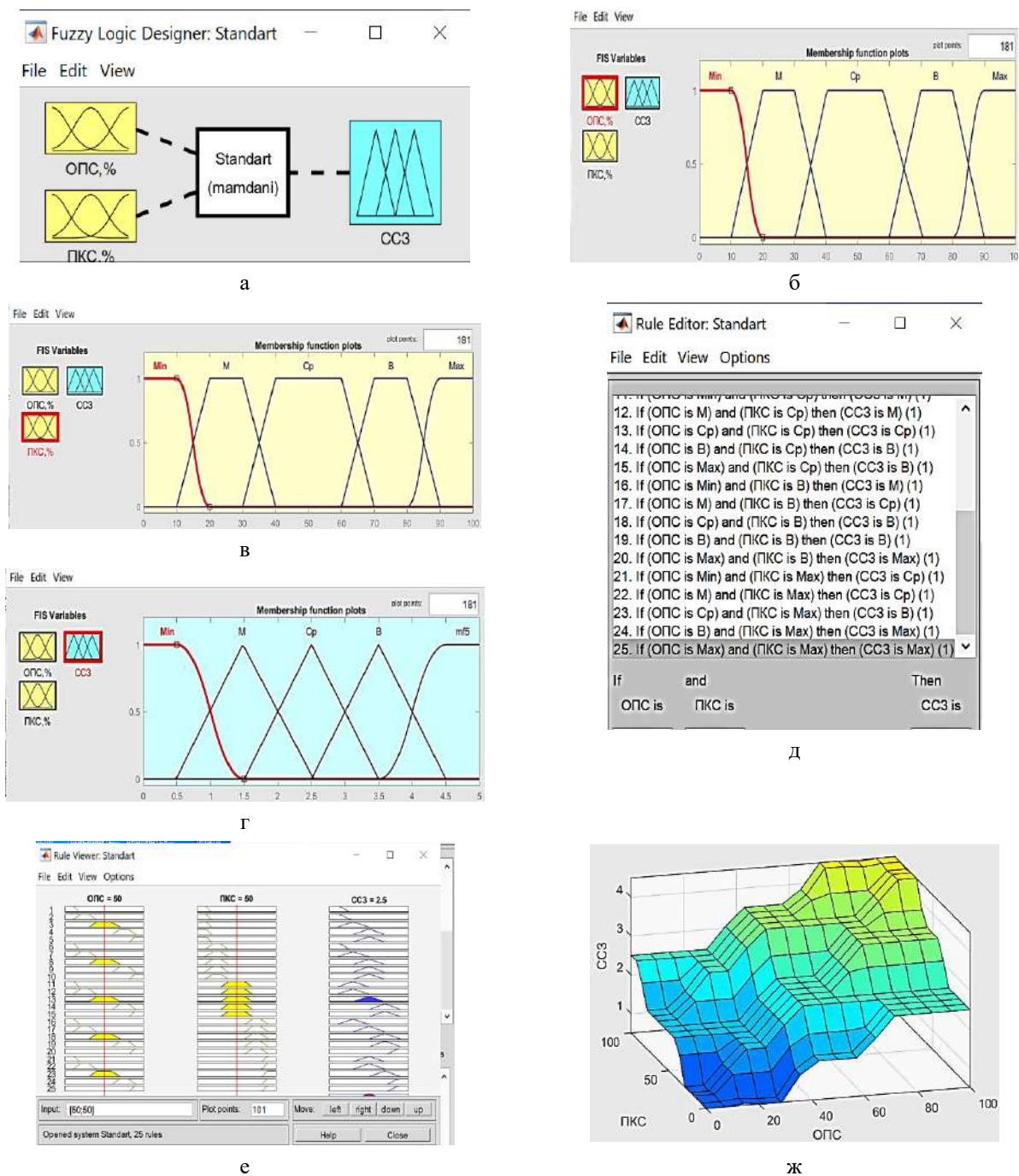


Рис. 2. Процедура нечеткого вывода и получения результирующей функции $CC3 = f(\text{ПКС}, \text{ОПС})$: а – схема нечеткого вывода; б – задание лингвистической переменной ОПС; в – задание лингвистической переменной ПКС; г – задание выходной лингвистической переменной CC3; д – создание базы правил; е – просмотр правил и результатов нечеткого вывода в приложении RuleViewer; ж – график результирующей функции $CC3 = f(\text{ПКС}, \text{ОПС})$

Fig. 2. The procedure for fuzzy inference and obtaining resulting function $CC3 = f(\text{ПКС}, \text{ОПС})$: a is a fuzzy inference scheme; б is setting linguistic variable ОПС; в is setting linguistic variable ПКС; г is setting output linguistic variable CC3; д is creating a database of rules; е is viewing the rules and results of fuzzy inference in the Rule Viewer application; ж is a graph of resulting function $CC3 = f(\text{ПКС}, \text{ОПС})$

Разработка подпрограммы оценки соответствия запросу в среде Simulink. Для практического применения нечеткой системы разработана подпрограмма оценки соответствия запросу, которая может использоваться в основном алгоритме для заключительного этапа оценки текста документа. Реализация этого модуля «Ozenka» выполнена в среде Simulink [12] (рис. 3). Программа работает следующим образом. В основном алгоритме выполняется анализ документов и рассчитываются значения переменных ПКС, ОПС. Затем они подаются на вход модуля «Ozenka». В данном случае для ввода исходных данных использованы блоки Constanta, в которые эти данные задаются пользователем.

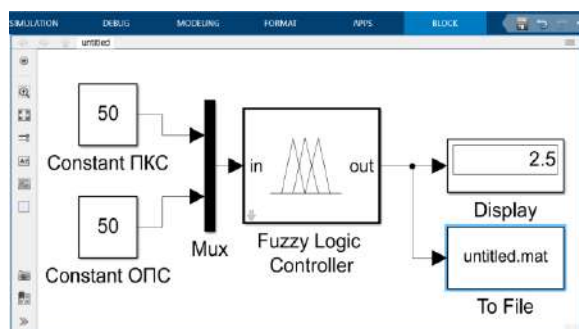


Рис. 3. Подпрограмма оценки соответствия запросу «Ozenka» в Simulink-формате

Fig. 3. The subroutine for assessing compliance with the query "Ozenka" in the Simulink format

Сигналы из блоков Constant поступают на мультилексор Mux, где они формируются в вектор для последовательной передачи в блок FuzzyLogicController. Здесь выполняется расчет оценки и ее значение передается на виртуальный дисплей – это блок Display. На рис. 3 в блоках Constant показаны значения исходных данных переменных ПКС и ОПС по 50%, а на дисплее выведено расчетное значение степени соответствия запросу, равное 2,5, что является точным соответствием объективной оценки.

Заключение

1. Предложена нечеткая система для интеллектуального поиска нормативных документов из различных баз данных.

2. Для практического использования результатов нечеткая система программно реализована в среде приложений MATLAB+FuzzyLogicDesigner и в виде отдельной подпрограммы в Simulink-формате оценки текста для основного алгоритма поиска.

3. Задача оценки соответствия текста параметров запроса решена в общем виде, поэтому является достаточно универсальной и в зависимости от заданного набора ключевых слов может быть рекомендована для поиска и оценки документов любого типа.

Список источников

1. Statista. URL: <https://www.statista.com>. (дата обращения: 12.12.2023).
2. Белта. URL: <https://www.belta.by>. (дата обращения: 12.12.2023).
3. Интегрированная система информационных ресурсов. URL: <http://isir.ras.ru> (дата обращения: 12.12.2023).
4. Национальная электронная библиотека. URL: <http://www.natlib.ru/> (дата обращения: 12.12.2023).
5. Электронная библиотека «Научное наследие России». URL: <http://nasledie.enip.ras.ru/index.html> (дата обращения: 12.12.2023).
6. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. URL: <https://www.rst.gov.ru/> (дата обращения: 12.12.2023).
7. Piegat A. Fuzzy Modeling and Control. Heidelberg, Physica-Verlag, 2001. 760 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-7908-1824-6>.
8. Федунев Б.Е. Бортовые интеллектуальные системы тактического уровня для антропометрических объектов (примеры для пилотируемых летательных аппаратов). М.: Де Либри, 2018. 246 с.
9. Нечеткое моделирование процесса естественной рекультивации нарушенных земель / Побединский В.В., Анянова Е.В., Ковалев Р.Н., Иовлев Г.А. // Resources and Technology. 2022. Т. 19. №1. С. 114-128.
10. Интеллектуальная система определения темпа потока при проектировании дорожных покрытий / Побединский В.В., Булдаков С.И., Кручинин И.Н., Ляхов С.В., Анастас Е.С., Карабутова И.А. // Деревообрабатывающая промышленность. 2021. №4. С. 31-41.
11. Корчунов А.Г. Моделирование трансформации показателей качества металлических изделий в процессах обработки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2009. №1. С. 76-78.
12. Хултен Джеф. Разработка интеллектуальных систем / пер. с англ. В.С. Яценкова. М.: ДМКПресс, 2019. 284 с.
13. MATLAB Release Notes for R20013b. MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com>. (дата обращения: 15.10.2023).
14. Применение алфавитного подхода для определения количества информации, содержащейся в стандартах / Казанцева Т.В., Казанцева Н.К., Полякова М.А., Пиджакова Е.Н., Александров В.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №4. С. 83-94.

References

1. Statista. Available at: <https://www.statista.com> (Accessed on December 12, 2023).
2. Belta. Available at: <https://www.belta.by>. (Accessed on December 12, 2023).
3. Integrated Information Resource System. Available at: <http://isir.ras.ru> (Accessed on December 12, 2023).

4. National Electronic Library. Available at: <http://www.natlib.ru/> (Accessed on December 12, 2023).
5. Electronic library "Scientific Heritage of Russia". Available at: <http://nasledie.enip.ras.ru/index.html> (Accessed on December 12, 2023).
6. Federal Agency for Technical Regulation and Metrology. Available at: <https://www.rst.gov.ru/> (Accessed on December 12, 2023).
7. Piegat A. Fuzzy modeling and control: monograph. Heidelberg, Physica-Verlag, 2001, 760 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-7908-1824-6>.
8. Fedunov B.E. Bortovye intellektualnye sistemy takicheskogo urovnya dlya antropometricheskikh obektov (primery dlya pilotiruemykh letatelnykh apparatov) [Onboard tactical-level intelligent systems for anthropometric objects (examples for manned aircraft)]. Moscow: De Libri, 2018, 246 p. (In Russ.)
9. Pobedinskiy V.V., Anyanova E.V., Kovalev R.N., Iovlev G.A. Fuzzy modeling of disturbed lands natural revegetation. Resources and Technology. 2022;19(1):114-128. (In Russ.)
10. Pobedinskiy V.V., Buldakov S.I., Kruchinin I.N., Lyakhov S.V., Anastas E.S., Karabutova I.A. An intelligent system for determining the flow rate when designing road surfaces. *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost* [Woodworking Industry]. 2021;(4):31-41. (In Russ.)
11. Korchunov A.G. Simulation of the transformation of metalware quality indicators in treatment processes. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2009;(1):76-78. (In Russ.)
12. Hulten G. *Razrabotka intellektualnykh sistem* [Building intelligent systems]. Moscow: DMK Press, 2019, 284 p. (In Russ.)
13. MATLAB Release Notes for R20013b. MathWorks. Available at: <https://www.mathworks.com>. (Accessed on October 15, 2023).
14. Kazantseva T.V., Kazantseva N.K., Polyakova M.A., Pidzhakova E.N., Aleksandrov V.A. Applying an alphabetical approach to determine the amount of information contained in standards. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022;20(4):83-94. (In Russ.)

Поступила 10.01.2024; принята к публикации 15.02.2024; опубликована 28.03.2024
Submitted 10/01/2024; revised 15/02/2024; published 28/03/2024

Побединский Владимир Викторович – доктор технических наук, профессор, Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия.
Email: pobedinskiyv@mail.ru. ORCID 0000-0001-6318-3447

Полякова Марина Андреевна – доктор технических наук, профессор, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: m.polyakova@magtu.ru. ORCID 0000-0002-1597-8867

Казанцева Татьяна Владимировна – старший преподаватель, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия.
Email: t.v.kazantseva@urfu.ru. ORCID 0000-0001-7051-614X

Казанцева Надежда Константиновна – кандидат технических наук, доцент, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия.
Email: n.k.kazantseva@urfu.ru. ORCID 0000-0001-9430-9604

Иовлев Григорий Александрович – кандидат экономических наук, Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия. Email: gri-iovlev@yandex.ru. ORCID 0000-0002-1837-3222

Vladimir V. Pobedinskiy – DrSc (Eng.), Professor, Ural State Agrarian University, Yekaterinburg, Russia.
Email: pobedinskiyv@mail.ru. ORCID 0000-0001-6318-3447

Marina A. Polyakova – DrSc (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: m.polyakova@magtu.ru. ORCID 0000-0002-1597-8867

Tatiana V. Kazantseva – Senior Lecturer, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia. Email: t.v.kazantseva@urfu.ru. ORCID 0000-0001-7051-614X

Nadezhda K. Kazantseva – PhD (Eng.), Associate Professor, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia.
Email: n.k.kazantseva@urfu.ru. ORCID 0000-0001-9430-9604

Grigory A. Iovlev – PhD (Economics), Ural State Agrarian University, Yekaterinburg, Russia.
Email: gri-iovlev@yandex.ru. ORCID 0000-0002-1837-3222

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 51-77
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-1-114-121



МОДЕЛЬ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ ЭМПИРИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Назаревич С.А., Свириденко А.В.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. С развитием и внедрением в производственные системы элементов Индустрии 4.0, а в частности цифровизации производства, цифровых двойников и систем дополненной реальности, всё более актуальной становится задача органичного внедрения цифровых технологий в производственные системы. Параллельно рассматривается вопрос о целесообразности внедрения новых технологий в начальной архитектуре внедряемой системы и её адаптации под особенности производственных процессов и помещений, а также организационной структуры предприятия. Взяв во внимание данные аспекты, можно говорить о проблеме принятия управленческих решений при планировании и реализации внедрения новых систем как о ключевой задаче. В статье моделируется ситуация внедрения системы штрихкодирования и мгновенной печати необходимого количества маркировки при упаковке готовых изделий на предприятии текстильной промышленности. Перед запуском системы возможно проведение предварительной регулировки системы, временно нарушив производственный процесс, что вызовет потери, связанные с ожиданием. Отказ от регулировки системы подвергает риску работоспособность системы в целом, повышая риск внезапного отказа системы и остановки производственного процесса. Для сокращения рисков возможно проведение процедуры верификации системы, что повлечет дополнительные финансовые затраты и не гарантирует выявления всех недоработок и ошибок системы. Лицу, принимающему решение, необходимо выбрать оптимальную стратегию для органичного внедрения новой системы в производственный процесс. В статье предложена модель принятия решения о необходимости регулировки внедряемой на предприятии системы электронного отслеживания партий изделий и определено оптимальное поведение лица, принимающего решение, в моделируемой ситуации. Область применения модели не ограничивается отраслью и сферой деятельности предприятия и может быть использована при необходимости принятия решения о внедрении нововведений в производственный процесс.

Ключевые слова: дерево принятия решений, формула Байеса, оптимизация, производственные процессы, управление качеством, бережливое производство, система штрихкодирования, технология принятия управленческих решений, организация производства, диспетчеризация производственных процессов

© Назаревич С.А., Свириденко А.В., 2024

Для цитирования

Назаревич С.А., Свириденко А.В. Модель принятия решений на основе эмпирических данных // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №1. С. 114-121. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-114-121>



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

A DECISION-MAKING MODEL BASED ON EMPIRICAL DATA

Nazarevich S.A., Sviridenko A.V.

Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia

Abstract. With the development and introduction of elements of Industry 4.0 into production systems, and in particular the digitalization of production, digital twins and augmented reality systems, the task of an organic introduction of digital technologies into production systems becomes more and more relevant. In parallel, the issue under consideration is attributed to feasibility of introducing new technologies into the initial architecture of the system being implemented and its adaptation to specific features of production processes and premises, as well as the organizational structure of the enterprise. Taking into account these aspects, we can talk about the problem of managerial decision-making, when planning and implementing the introduction of new systems as a key task. This paper presents a modeled situation of the introduction of a barcoding system and instant printing of the required amount of labeling, when packing finished products at a textile industry enterprise. It is possible to pre-adjust the system before its start, temporarily interrupting a production process, which will cause losses associated with waiting. Failure to adjust the system puts at risk the operability of the system as a whole, increasing the risk of a sudden system failure and shutdown of the production process. To reduce risks, it is possible to carry out a system verification procedure, which will entail additional financial costs and not guarantee the identification of all the flaws and errors of the system. A decision-maker needs to choose the optimal strategy for the organic implementation of the new system in the production process. The paper proposes a decision-making model on the need to adjust the electronic tracking system of product batches implemented at the enterprise and determines the optimal behavior of the decision-maker in the simulated situation. The scope of the model is not limited to the industry and field of activity of the enterprise and can be used when it is necessary to make a decision on the introduction of innovations into the production process.

Keywords: decision tree, Bayes formula, optimization, production processes, quality management, lean manufacturing, barcoding system, management decision-making technology, production organization, dispatching of production processes

For citation

Nazarevich S.A., Sviridenko A.V. A Decision-Making Model Based on Empirical Data. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 1, pp. 114-121. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-114-121>

Введение

Согласно литературным источникам, только 17% решений принимаются обдуманно, остальные 83% принимаются необдуманно [1]. Особенно важно учитывать влияние совокупности всех факторов и опираться на вполне конкретные методы принятия управленческих решений, поскольку в практических задачах результаты принятия управленческих решений многоаспектны и требуют своей оценки по множеству показателей [2]. Именно поэтому исследования в области принятия управленческих решений в большей степени сосредоточены на стратегических решениях, касающихся конфигурации ресурсов для поддержки стратегии предприятия [3, 4].

В данной статье моделируется ситуация по принятию решения о модификации системы учета и регистрации готовых изделий в процессе упаковки путем добавления функции присвоения каждой партии штрихкода и мгновенной печати необходимой маркировки. Кодировка такого типа включает в себя уникальный номер товара, который принадлежит только ему, а также несет введенную заранее инфор-

мацию о продукции. Таким образом, нововведение повлечет за собой частичное изменение технологической схемы.

До внедрения данной системы технологический процесс упаковки готовых изделий включал в себя следующие основные операции: подача упаковочных материалов, подготовка тары к процессу упаковывания и маркировка, подача изделия и наполнение им тары, запечатывание тары. Блок-схема процесса представлена на **рис. 1**. Основным недостатком данной технологической схемы являются временные затраты на поиск необходимой маркировки в библиотеке и в случае отсутствия таковой в библиотеке – необходимость создания и печати недостающей маркировки.

Внедрение системы штрихкодирования и мгновенной печати необходимой маркировки значительно сокращает технологический процесс, исключив из него поиск этикеток в библиотеке (**рис. 2**). При проведении хронометрических исследований процесса было выявлено сокращение временных потерь на 2 минуты при использовании системы в технологическом процессе.

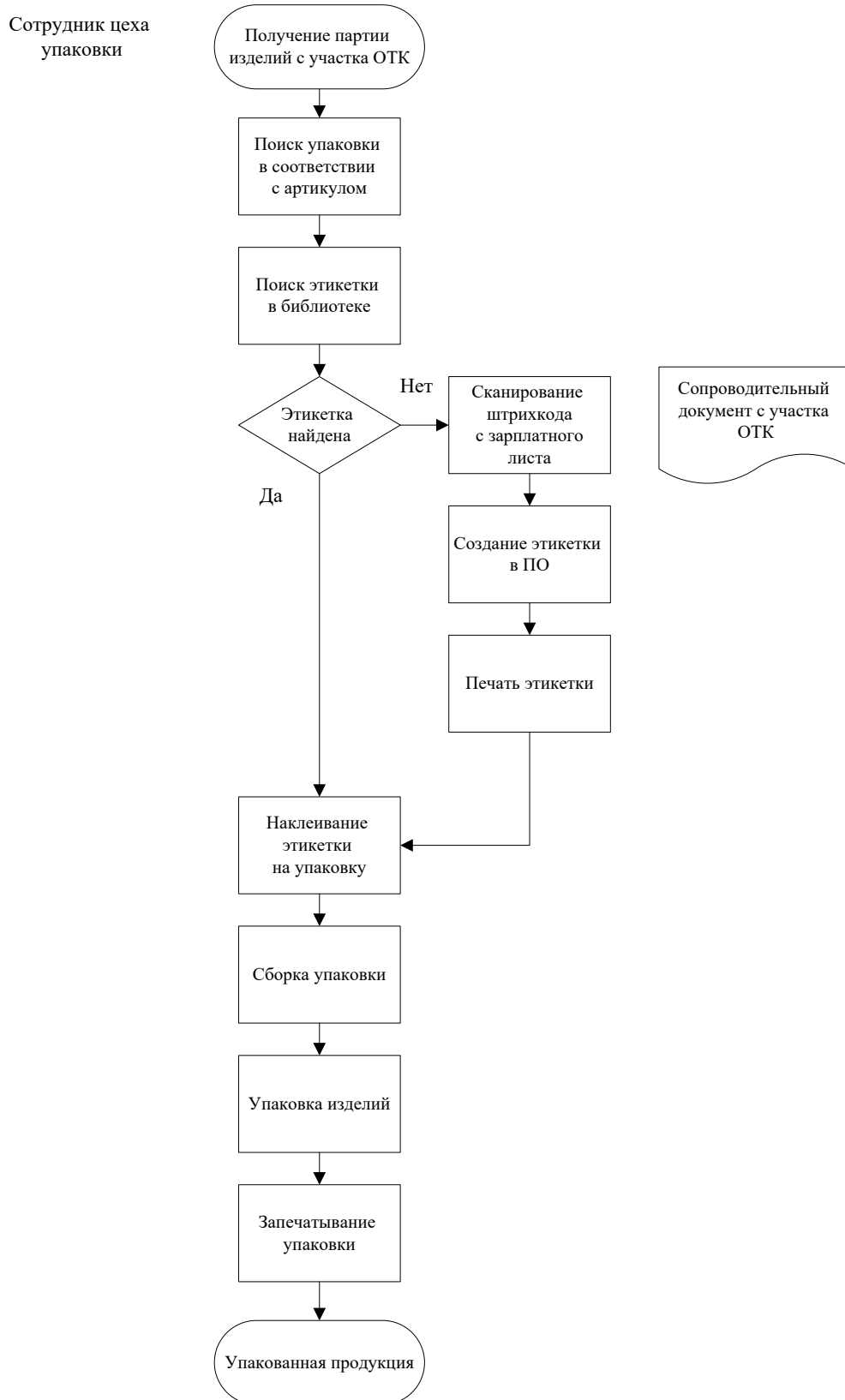


Рис. 1. Блок-схема исходного процесса упаковки
 Fig. 1. A block diagram of the initial packing process

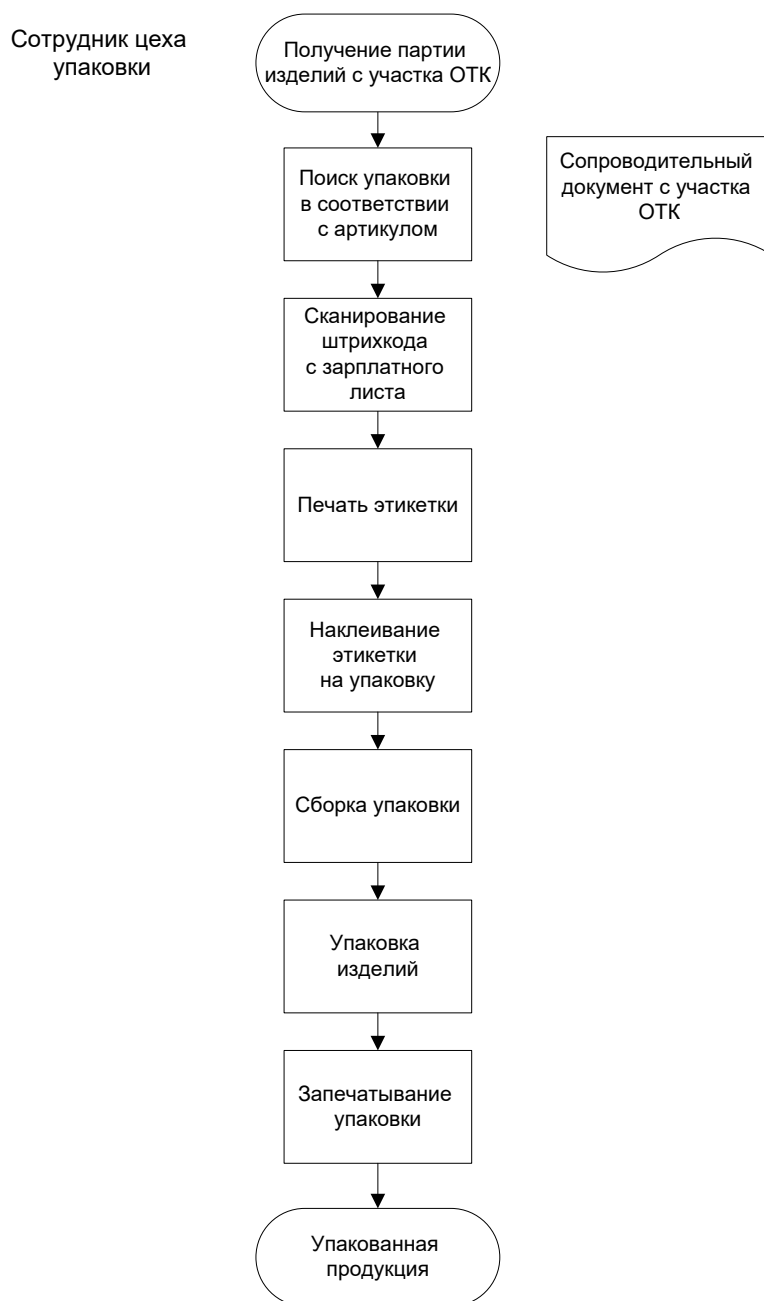


Рис. 2. Блок-схема процесса упаковки с использованием системы
 Fig. 2. A block diagram of the packing process using the system

Материалы и методы исследования

В процессе внедрения данной системы возможно проведение предварительной регулировки системы, что повлечет за собой дополнительные экономические затраты. В случае неисправности системы собой в работе повлечет остановку работы всего цеха.

Принять решение о проведении работ по регулировке системы возможно с помощью теста, носящего диагностический характер для установления природы возможной проблемы, её содержания, силы взаимосвязи с другими проблемами, вида и масштаба опасностей, притекающих из проблемы [5]. Притом

проведение диагностики повлечет дополнительные экономические затраты и не гарантирует выявления всех недоработок и ошибок системы. Данная задача относится к задачам принятия решения в условиях риска. Соответственно, для определения оптимального поведения лица, принимающего решение, в данной ситуации необходимо проведение качественной структуризации задачи (табл. 1) [6, 7].

В статье используется количественный метод принятия решений, в данном случае включающий в себя дерево принятия решений с вероятностной оценкой ветвей дерева. Перейдем к структуризации задачи.

Лицо, принимающее решение, выполняет эксперимент *A*, наблюдает результат этого эксперимента *B* и выбирает определенное действие *C*, исход которого определяется состоянием *E*.

Таблица 1. Качественная структуризация задачи
Table 1. Qualitative structuring of the task

Множество	Элементы	Интерпретация
<i>A</i>	<i>a</i> ₁	Проводить тест системы
	<i>a</i> ₂	Не проводить тест системы
<i>B</i>	<i>b</i> ₁	Выявлены значительные недоработки
	<i>b</i> ₂	Выявлены незначительные недоработки
	<i>b</i> ₃	Недоработок не выявлено
	<i>b</i> ₄	Результаты нулевого эксперимента
<i>C</i>	<i>c</i> ₁	Решение отрегулировать систему
	<i>c</i> ₂	Решение не регулировать систему
<i>E</i>	<i>e</i> ₁	Система требует регулировки
	<i>e</i> ₂	Система не требует регулировки

На основе качественной структуризации задачи можно сопоставить возможные действия лица, принимающего решение, и получаемой им информации в хронологическом порядке с использованием дерева

принятия решений (рис. 3).

Рассмотрим вероятностные характеристики процессов, определяющих ветвление дерева принятия решений, опираясь на имеющуюся эмпирическую информацию в сочетании с экспертной оценкой лица, принимающего решение. Для рассматриваемой ситуации имеем:

- 1) $p(e_1)$ – вероятность, что система требует регулировки;
- 2) $p(e_2)$ – вероятность, что система не требует регулировки;
- 3) $p(b_1/e_1)$ – вероятность, что тест выявил значительные недоработки и система действительно требует регулировки;
- 4) $p(b_2/e_1)$ – вероятность, что тест выявил незначительные недоработки и система действительно требует регулировки;
- 5) $p(b_3/e_1)$ – вероятность, что тест не выявил недоработки, а система в действительности требует регулировки;
- 6) $p(b_1/e_2)$ – вероятность, что тест выявил значительные недоработки, но в действительности система не требует регулировки;
- 7) $p(b_2/e_2)$ – вероятность, что тест выявил незначительные недоработки и система не требует регулировки;
- 8) $p(b_3/e_2)$ – вероятность, что тест не выявил недоработки и система не требует регулировки.

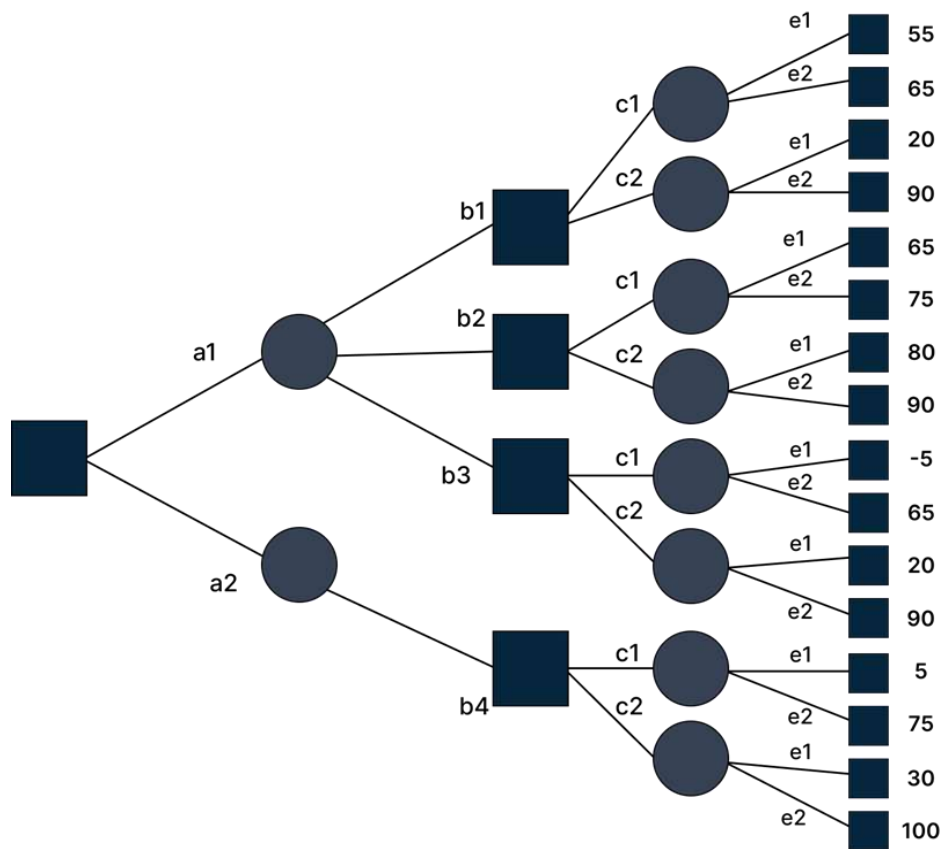


Рис. 3. Дерево принятия решений
Fig. 3. Decision tree

Пусть $p(e_1) = 0,2$, $p(e_2) = 0,8$, $p(b_1/e_1) = 0,8$, $p(b_2/e_1) = 0,15$, $p(b_3/e_1) = 0,05$, $p(b_1/e_2) = 0,01$, $p(b_2/e_2) = 0,09$, $p(b_3/e_2) = 0,9$.

Также рассмотрим стоимость каждого элемента системы в условных единицах:

- 1) стоимость исправной системы – 100 усл. ед.;
- 2) стоимость частично неисправной системы – 90 усл. ед.;
- 3) стоимость неисправной системы – 30 усл. ед.;
- 4) стоимость регулировки при значительных сбоях системы – 25 усл. ед.;
- 5) стоимость регулировки при незначительных сбоях системы – 15 усл. ед.;
- 6) стоимость теста – 10 усл. ед.

В соответствии с приведенными данными возможно определение ценности каждой из ветвей (табл. 2).

Таблица 2. Ценность ветвей
Table 2. The value of branches

Путь ветви	Расчет	Итог
$(a_1, b_1, c_1, e_1) =$	90-10-25	55
$(a_1, b_1, c_1, e_2) =$	100-10-25	65
$(a_1, b_1, c_2, e_1) =$	30-10	20
$(a_1, b_1, c_2, e_2) =$	100-10	90
$(a_1, b_2, c_1, e_1) =$	90-10-15	65
$(a_1, b_2, c_1, e_2) =$	100-10-15	75
$(a_1, b_2, c_2, e_1) =$	90-10	80
$(a_1, b_2, c_2, e_2) =$	100-10	90
$(a_1, b_3, c_1, e_1) =$	30-10-25	-5
$(a_1, b_3, c_1, e_2) =$	100-10-25	65
$(a_1, b_3, c_2, e_1) =$	30-10	20
$(a_1, b_3, c_2, e_2) =$	100-10	90
$(a_2, b_4, c_1, e_1) =$	30-25	5
$(a_2, b_4, c_1, e_2) =$	100-25	75
$(a_2, b_4, c_2, e_1) =$	30	30
$(a_2, b_4, c_2, e_2) =$	100	100

Полученные результаты и их обсуждение

Таким образом, рассмотрим развёрнутую форму анализа и исследуем дерево решений в обратном направлении. Ценность действия в случае, когда тест не применялся, но лицо, принимающее решение, приняло решение провести регулировку системы, равна $U(a_2, b_4, c_1) = 0,2 \cdot 5 + 0,8 \cdot 75 = 61$.

В противном случае при отказе от регулировки системы ценность данного действия $U(a_2, b_4, c_2) = 0,2 \cdot 30 + 0,8 \cdot 100 = 86$.

По результатам расчета оптимальным действием лица, принимающего решение, будет не регулировать систему в случае, когда тест не применялся.

В случае применения теста задача оценки лучшего пути на дереве решений требует расчета условных вероятностей. Данные вероятностные оценки могут быть найдены с помощью формулы (теоремы) Байеса:

$$p(e_i / b) = \frac{p(e_i) \cdot p(b / e_i)}{\sum_{i=1}^n p(e_i) \cdot p(b / e_i)} \quad (1)$$

Результаты расчетов условных вероятностей представлены в табл. 3, 4.

Таблица 3. Результаты расчета совместных и безусловных вероятностей состояний и исходов

Table 3. Results of calculation of joint and unconditional probabilities of states and outcomes

Результат эксперимента	Состояние природы		P(b)
	e_1	e_2	
b_1	$0,2 \cdot 0,8 = 0,16$	$0,8 \cdot 0,01 = 0,008$	0,168
b_2	$0,2 \cdot 0,15 = 0,03$	$0,8 \cdot 0,09 = 0,072$	0,102
b_3	$0,2 \cdot 0,05 = 0,01$	$0,8 \cdot 0,9 = 0,72$	0,73
$p(e)$	0,2	0,8	1

Таблица 4. Результаты расчета условных вероятностей
Table 4. Results of calculation of conditional probabilities

B	$p(e_1/b)$	$p(e_2/b)$	$p(e_1/b) + p(e_2/b)$
b_1	0,95	0,05	1,0
b_2	0,30	0,70	1,0
b_3	0,01	0,99	1,0

Получив условные вероятности каждой ветви, возможно определить их ценность путем умножения условных вероятностей на ценность каждого действия (табл. 5).

Таблица 5. Ценность ветвей в перерасчете на вероятности

Table 5. The value of branches in terms of probabilities

$U(a_1, b_1, c_1) = Sp(e) \cdot U(a_1, b_1, c_1, e) =$	$0,95 \cdot 55 + 0,05 \cdot 65$	55,5
$U(a_1, b_1, c_2) = Sp(e) \cdot U(a_1, b_1, c_2, e) =$	$0,95 \cdot 20 + 0,05 \cdot 90$	23,5
$U(a_1, b_2, c_1) = Sp(e) \cdot U(a_1, b_2, c_1, e) =$	$0,30 \cdot 65 + 0,70 \cdot 75$	72
$U(a_1, b_2, c_2) = Sp(e) \cdot U(a_1, b_2, c_2, e) =$	$0,30 \cdot 80 + 0,70 \cdot 90$	87
$U(a_1, b_3, c_1) = Sp(e) \cdot U(a_1, b_3, c_1, e) =$	$0,01 \cdot (-5) + 0,99 \cdot 65$	64,3
$U(a_1, b_3, c_2) = Sp(e) \cdot U(a_1, b_3, c_2, e) =$	$0,01 \cdot 20 + 0,99 \cdot 90$	89,3
$U(a_2, b_4, c_1) = Sp(e) \cdot U(a_2, b_4, c_1, e) =$	$0,2 \cdot 5 + 0,8 \cdot 75$	61
$U(a_2, b_4, c_2) = Sp(e) \cdot U(a_2, b_4, c_2, e) =$	$0,2 \cdot 30 + 0,8 \cdot 100$	86

В ходе анализа табл. 5 выявлено, что ценность оптимального решения в каждом из случаев будет равна:

$$U(a_1, b_1, e^*) = 55,5;$$

$$U(a_1, b_2, e^*) = 87;$$

$$U(a_1, b_3, e^*) = 89,3;$$

$$U(a_1, b_4, e^*) = 86.$$

Следовательно, если результатом эксперимента является исход b_1 : тест показывает, что выявлены значительные недоработки системы, то лицу, принимающему решение, следует выбрать действие e_1 : регулировать систему.

В случае если результатом эксперимента является исход b_2 : тест показывает, что выявлены незначительные недоработки, то целесообразно выбрать действие e_2 : не прибегать к регулировке системы.

Если в результате эксперимента получен исход b_3 : тест показывает, что недоработки не выявлены, то необходимо выбрать действие e_2 : отказаться от регулировки системы.

Для определения ожидаемой ценности эксперимента $U(a)$ воспользуемся формулой

$$U(a) = \sum p(b) \cdot U(a, b). \quad (2)$$

Расчет представлен по формуле [8-10]

$$U(a) = p(b_1) \cdot U(a, b_1) + p(b_2) \cdot U(a, b_2) + p(b_3) \cdot U(a, b_3) = 0,168 \cdot 55,5 + 0,102 \cdot 87 + 0,73 \cdot 89,3 = 83,4. \quad (3)$$

Заключение

Оптимальная последовательность действий лица, принимающего решение, состоит в следующем: регулировать систему только при выявлении тестом значительных недоработок, в случае выявления незначительных недоработок или при отсутствии недоработок – не прибегать к регулировке. При отказе от применения теста оптимальным решением будет отказ от регулировки системы штрихкодирования и мгновенной печати необходимой маркировки в процессе упаковки готовых изделий.

Таким образом, применение моделей принятия решений – важный инструмент управления бизнес-процессами и поддержки принятия решений, так как позволяет принять решение, соответствующее возможностям предприятия с оценкой потенциальных потерь. Кроме того, такие модели принятия решений могут быть интегрированы в системы планирования ресурсов предприятия и выполняться для проверки и анализа принимаемых управленческих решений на предприятии.

Список источников

1. Коваленко В.П., Соколюк В.М. Технология принятия решений // Вестник Полесского государственного университета. Серия природоведческих наук. 2008. №2. С. 52-58.

2. Воробьева М.В. Анализ методов многокритериального принятия решений // Региональная и отраслевая экономика. 2022. №1. С. 24-28.
3. Гладкова Ю.В., Гладков В.П. Этапы принятия управленческих решений // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2010. №4. С. 39-44.
4. Антонов В.В., Конев К.А., Куликов Г.Г. Трансформация модели системы поддержки принятия решений для типовых ситуаций с применением интеллектуальных и аналитических методов // Вестник ЮУрГУ. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2021. №3. С. 14-25.
5. Mochammad Ridwan Ristyawan, U. Putro, M. Siallagan Decision making mechanism in resource based theory: A literature review, synthesis, and future research // Cogent Business & Management. 2023, no. 10, 2247217.
6. Досуева Е.Е., Кириллов Ю.В. Рациональный подход к принятию управленческих решений // Идеи и идеалы. 2014. №1(19). С. 89-98.
7. Гамбаров Турхан Ризван Оглы. Модель пошагового процесса принятия рационального управленческого решения // Азимут научных исследований: экономика и управление. 2019. Т. 8. №1 (26). С. 119-122.
8. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика. Основы моделирования и первичная обработка данных. М.: Финансы и статистика, 1983.
9. Теория вероятностей и математическая статистика в задачах: учеб. пособие / В.А. Ватутин, Г.И. Ивченко, Ю.И. Медведев и др. 3-е изд., испр. М.: Дрофа, 2005.
10. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие. 12-е изд., перераб. М.: Высшее образование, 2007.

References

1. Kovalenko V.P., Sokolyuk V.M. Technology of decision-making. *Vestnik Polesskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya prirodovedcheskikh nauk* [Bulletin of Polesky State University. Series in Natural Sciences]. 2008;(2):52-58. (In Russ.)
2. Vorobyeva M.V. Analysis of methods of multi-criteria decision-making. *Regionalnaya i otraslevaya ekonomika* [Regional and Sectoral Economics]. 2022;(1):24-28. (In Russ.)
3. Gladkova Yu.V., Gladkov V.P. Stages of managerial decision-making. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotekhnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya* [Bulletin of PNRPU. Electrical Engineering, Information Technology, Control Systems]. 2010;(4):39-44. (In Russ.)
4. Antonov V.V., Konev K.A., Kulikov G.G. Transform

- mation of the decision support system model for typical situations using intellectual and analytical methods. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Kompyuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika* [Bulletin of SUSU. Series: Computer Technology, Control, Radio Electronics]. 2021;(3):14-25. (In Russ.)
5. Mochammad Ridwan Ristyawan, Putro U., Siallagan M. Decision making mechanism in resource based theory: A literature review, synthesis, and future research. *Cogent Business & Management*. 2023;(10): 2247217.
 6. Dosuzheva E.E., Kirillov Yu.V. Rational approach to managerial decision-making. *Idei i idealy* [Ideas and Ideals]. 2014;(1(19)):89-98. (In Russ.)
 7. Gambarov Turkhan Rizvan Ogly. A model of a step-by-step process of making a rational managerial decision. *Azimuth nauchnykh issledovaniy: ekonomika i upravlenie* [Azimuth of Scientific Research: Economics and Management]. 2019;8(1(26)):119-122. (In Russ.)
 8. Ayvazyan S.A., Enyukov I.S., Meshalkin L.D. *Prikladnaya statistika. Osnovy modelirovaniya i pervichnaya obrabotka dannykh* [Applied statistics. Fundamentals of modeling and primary data processing]. Moscow: Finansy i statistika, 1983. (In Russ.)
 9. Vatutin V.A., Ivchenko G.I., Medvedev Yu.I. et al. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika v zadachakh: ucheb. posobie* [Probability theory and mathematical statistics in problems: study guide]. Moscow: Drofa, 2005. (In Russ.)
 10. Gmurman V.E. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika: ucheb. posobie* [Probability theory and mathematical statistics: study guide]. Moscow: Vysshee obrazovanie, 2007. (In Russ.)

Поступила 22.11.2023; принята к публикации 12.01.2024; опубликована 28.03.2024
Submitted 22/11/2023; revised 12/01/2024; published 28/03/2024

Назаревич Станислав Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, кафедра инноватики и интегрированных систем качества, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия.
Email: albus87@inbox.ru. ORCID 0000-0002-0665-8036

Свириденко Анастасия Вячеславовна – студент, кафедра инноватики и интегрированных систем качества, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия. Email: an.sviridenko29@gmail.com. ORCID 0009-0005-2979-5235

Stanislav A. Nazarevich – PhD (Eng.), Associate Professor, Department of Innovation Studies and Integrated Quality Systems, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia.
Email: albus87@inbox.ru. ORCID 0000-0002-0665-8036

Anastasiya V. Sviridenko – student, Department of Innovation Studies and Integrated Quality Systems, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia.
Email: an.sviridenko29@gmail.com. ORCID 0009-0005-2979-5235

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 658.5
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-1-122-131



РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКОГО ПОДХОДА К ОЦЕНКЕ ВЕРОЯТНОСТИ ВЫИГРЫША КОНКУРСА С ЦЕЛЬЮ ПЛАНИРОВАНИЯ ЗАГРУЗКИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ МОЩНОСТЕЙ

Третьякова В.А., Горлачева Е.Н.

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

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Проблема участия в государственных закупках существует для многих предприятий обрабатывающей промышленности. Основной вопрос связан с целесообразностью участия и оценкой вероятности выигрыша в конкурсе на поставку продукции. С одной стороны, участие в госзакупках гарантирует стабильный спрос в виде постоянных заказов, а следовательно, более тщательное планирование полной загрузки производственных мощностей предприятий. С другой стороны, конкурс – это вероятность не только выигрыша, но и проигрыша. Сложность формальной процедуры участия, необходимость обеспечения гарантийных обязательств и, как следствие, заморозка оборотных активов приводят к тому, что предприятия зачастую отказываются от участия в госзакупках. **Цель работы.** Разработать методический подход, позволяющий производственным предприятиям заблаговременно оценить шансы и вероятность выигрыша в том или ином конкурсе для возможности оперативного планирования загрузки производственных мощностей. **Используемые методы.** В качестве методологической рамки исследования используются логический анализ и аппарат регрессионного анализа, адаптированные к данной научной задаче. **Новизна.** Анализ публикаций по теме исследования показал, что вопросы участия в госзакупках рассматриваются либо с позиции управленческого подхода, либо с позиции исследований института госзакупок. Проблема участия в госзакупках практически не рассматривается с учетом планирования загрузки производственных мощностей промышленных предприятий. Научная новизна заключается в выборе фокуса на вопросы участия в госзакупках и разработки методического подхода к оценке вероятности выигрыша. **Результат.** Впервые предложен новый методический подход к оценке вероятности выигрыша промышленного предприятия в конкурсе госзакупок. Используется логический анализ и аппарат регрессионного анализа. **Практическая значимость.** В работе предлагается методический подход оценки вероятности выигрыша и целесообразности участия промышленного предприятия в госзакупках, который представляет собой практический инструмент для лица, принимающего решение.

Ключевые слова: организация производства, планирование промышленного производства, обрабатывающая промышленность, производственные мощности, регрессионный анализ, оценка вероятности, методический подход, госзакупка

© Третьякова В.А., Горлачева Е.Н., 2024

Для цитирования

Третьякова В.А., Горлачева Е.Н. Разработка методического подхода к оценке вероятности выигрыша конкурса с целью планирования загрузки производственных мощностей // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №1. С. 122-131. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-122-131>



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

THE ELABORATION OF A METHODOLOGICAL APPROACH TO ESTIMATING THE PROBABILITY OF WINNING A COMPETITION TO PLAN PRODUCTION CAPACITY UTILIZATION

Tretyakova V.A., Gorlacheva E.N.

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The problem of taking part in public procurement is currently relevant for many manufacturers. A key issue is attributed to feasibility of the participation and the probability estimate of winning a competition for delivery of products. On the one part, the participation in public procurement guarantees steady demand represented by standing orders and, consequently, more thorough planning and full utilization of production capacities of enterprises. On the other part, a competition is the probability of not only winning, but also losing. The complexity of the formal participation procedure, the need for ensuring warranty obligations, and, as a consequence, the freezing of current assets are factors frequently resulting in a refusal of manufacturing enterprises to take part in public procurement. **Objectives.** The paper is aimed at developing a methodological approach used by manufacturing enterprises to estimate chances and the probability of winning a particular competition in advance to get a possibility of prompt planning of production capacity utilization. **Methods Applied.** The methodological framework of the research includes a logical analysis and tools of the regression analysis adapted to this scientific task. **Originality.** The analysis of publications on the research field showed that the issues of the participation in public procurement were considered from the point of either a managerial approach, or research by the institute of public procurement. The problem of the participation in public procurement is practically not considered taking into account production capacity utilization. Scientific novelty lies in choosing focus on the issues of the participation in public procurement and development of a methodological approach to estimating the probability of winning. **Results.** For the first time, a new methodological approach was proposed to estimate the probability of winning a public procurement competition by an industrial enterprise. The authors used a logical analysis and tools of the regression analysis. **Practical Relevance.** The paper proposes a methodological approach to estimating the probability of winning and feasibility of the participation of industrial enterprises in public procurement, which is a practical tool for a decision-maker.

Keywords: industrial engineering, manufacturing planning, manufacturing industry, production facilities, regression analysis, probability estimation, methodological approach, public procurement

For citation

Tretyakova V.A., Gorlacheva E.N. The Elaboration of a Methodological Approach to Estimating the Probability of Winning a Competition to Plan Production Capacity Utilization. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 1, pp. 122-131. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-122-131>

Введение

Планирование загрузки производственных мощностей является актуальной задачей любого промышленного предприятия. Однако нерегулярный спрос на продукцию затрудняет эффективное распределение ресурсов, препятствует технологическому развитию предприятия. Известно, что государство выполняет не только регулирующие и надзорные функции, но и напрямую участвует в хозяйственной деятельности общества через механизм государственных закупок. В этом качестве государство, по сути, выступает крупнейшим заказчиком различных товаров и услуг, оказывая существенное влияние на экономическую деятельность хозяйствующих субъектов. Реализация государственных заказов для коммерческого промышленного предприятия является определенным преимуществом перед конкурентами – наличие регулярных заказов.

Однако процесс участия в госзакупках формирует определенные требования к участникам, и формальное соответствие требованиям не означает безусловного выигрыша в том или ином конкурсе. На основе проведенного анализа литературы [1-3] можно выделить следующие причины, затрудняющие участие предприятия в конкурсной процедуре:

- сложность законодательства и запутанность формальной процедуры конкурса;
- необходимость постоянного мониторинга сайта госзакупок и различных электронных площадок на предмет поиска информации по закупкам;
- необходимость привлечения дополнительного отдельного сотрудника для отслеживания информации;
- увеличение трудозатрат на обработку информации (необходимость приобретения платных подписок для отслеживания торгов);
- наличие свободных денежных средств для получения аккредитации на электронно-торговую пло-

щадку (ЭТП), а также обеспечительных мер исполнения госконтрактов и для обеспечения гарантийных обязательств в постгарантийный период;

– наличие банковской гарантии: выполнение требований для получения такой гарантии (существование на рынке несколько лет, положительный кредитный рейтинг, положительный баланс, ликвидные активы).

Перечисленные проблемы актуализируют процесс принятия решения лицом, принимающим решения (ЛПР), о целесообразности госзакупок. В настоящей работе предлагается разработка подхода определения вероятности выигрыша в конкурсе на основе логического и адаптированного регрессионного анализа. Для достижения поставленной цели обозначим следующие задачи: провести анализ исследований отечественных и зарубежных авторов по теме контрактных взаимоотношений между промышленными предприятиями и госзаказчиком, определить методы исследования и разработать новый методический подход к планированию загрузки производственных мощностей.

Статья структурирована следующим образом: во введении описана решаемая научная проблема, далее проведен анализ литературных источников и сделан вывод, что, несмотря на объективную необходимость оперативного планирования промышленного производства, в работах (литературе) нет взаимосвязки участия предприятий в конкурсных процедурах и учета вероятности выигрыша при планировании загрузки производственных мощностей. Затем описан разрабатываемый методический подход, показан пример практического применения подхода и представлены выводы.

Анализ литературных источников

Анализ современной литературы показал, что проблема оптимальной загрузки производственных мощностей является одной из актуальных, поскольку напрямую влияет на повышение производительности труда, технологичности производства и опосредованно на экономический рост [4].

По данным, приведенным в [5], Россия относится к числу стран с наиболее низким уровнем загрузки производственных мощностей, наряду с такими странами, как Тайланд, Бангладеш, Нигерия. При этом в условиях санкционного давления и ограниченного доступа к мировым рынкам финансового капитала рост уровня загрузки производственных мощностей является тем механизмом, который способен обеспечить рост промышленного производства.

В работе [6] обосновывается система планирования загрузки производственных мощностей, позволяющая учитывать критерии срочности отдельных заказов, ограничения по мощности, ресурсам, взаимосвязи между объектами калькулирования, по критерию минимальной стоимости.

В работе [7] исследуются стратегии адаптации производственных мощностей к условиям спроса.

Обосновано, что на выбор стратегии управления производственной мощностью влияет в том числе и характер спроса – рост или спад.

В работе [8] разработана система бизнес-анализа, включающая модуль прогнозирования межцеховой нагрузки, который позволяет улучшить качество оперативного планирования в период реализации производственного процесса.

В цикле статей Умновой М.Г. [2, 3] рассматриваются аспекты взаимодействия организаций-поставщиков при реализации госзаказов, подробно анализируются требования, предъявляемые к поставщикам. Также представлена авторская классификация рисков и потеря из-за повышенной финансовой нагрузки в процессе исполнения госзаказов. Однако взаимосвязь между участием в госзакупках и загрузкой производственных мощностей не рассматривается.

В целом в рассмотренных работах довольно подробно, но отдельно исследуются вопросы оперативного планирования, алгоритмов загрузки производственных мощностей и участия в госзакупках, однако нет взаимосвязки участия предприятий в конкурсных процедурах и учета вероятности выигрыша при планировании загрузки производственных мощностей.

С целью восполнения пробела в настоящей работе предлагается подход, необходимый для практического использования в деятельности промышленного предприятия обрабатывающей промышленности.

Разработка методического подхода к планированию загрузки производственных мощностей

Введение в эксплуатацию Единой информационной системы (ЕИС) позволяет в настоящее время получить доступ ко всем сведениям о государственных закупках в России и тем самым собрать полную информацию о заказчиках, поставщиках, контрактах и их условиях и другую, то есть информацию, необходимую для принятия решения.

Законодательство о контрактной системе устанавливает несколько способов проведения закупочных процедур: аукцион, конкурс, запрос котировок, запрос предложений и закупка у единственного поставщика. В рамках 44-ФЗ строго регулируются все этапы сделки по закупкам госзаказчиков, в отличие от 223-ФЗ, когда закон устанавливает только общие принципы закупок для госзаказчиков, а они сами разрабатывают собственные положения, в которых описывают требования к участникам и способы определения поставщиков. В зависимости от способа закупки и федерального закона в рамках, которого она проводится, применяются различные правила выбора поставщика. При проведении аукциона или запросе котировок побеждает участник, предложивший наименьшую цену, а при проведении конкурсов или подаче предложений победитель устанавливается по нескольким критериям, которые Заказчик прописывает в закупочных документах. Такие разные способы

выбора поставщика требуют и разной подготовки к участию с их стороны. По данным ЕИС в настоящее время около 70% всех закупок проводится в рамках 44-ФЗ и около 80% из них в виде электронных аукционов или запроса котировок. Следовательно, можно сделать вывод, что в большинстве случаев выбор поставщика осуществляется по предложенной им минимальной цене.

В общем виде можно сформулировать этапы подготовки к каждому конкурсу (тендеру):

1. Анализ опубликованной заявки:

– анализ условий конкурса и собственных возможностей;

– оценка привлекательности заявки;

– проверка надежности Заказчика;

– анализ прошлого опыта.

2. Формирование и обоснование пороговой цены, которую предприятие может предложить в условиях данного конкурса.

3. Сбор информации по каждому конкуренту по анализируемому продукту за предыдущий период.

4. Анализ соответствия конкурентов условиям объявленного конкурса и выбор потенциальных участников.

5. Прогнозирование минимальной цены, которую может предложить конкурент в условиях объявленного конкурса.

6. Анализ полученных результатов и оценка вероятности победы в конкурсе.

7. Принятие решения об участии в конкурсе.

8. Разработка стратегии поведения в аукционе.

Анализ опубликованной заявки позволяет собрать всю информацию о Заказчике и закупаемом им продукте с сопровождающими условиями поставки. На основании собранной информации принимается решение о том, насколько объявленный конкурс представляет интерес для предприятия и оцениваются собственные возможности для участия в нем, в том числе и наличие свободных мощностей для выполнения потенциального заказа.

Если принятое решение положительно, то необходимо рассчитать свой порог минимальной цены, то есть цены, за которую предприятие готово выполнить все условия объявленного конкурса.

Далее важно оценить свои шансы на победу в конкурсе, то есть сравнить свой нижний порог цены с ценами возможных конкурентов в данном конкурсе.

Сбор информации по каждому конкуренту – трудоемкая и длительная работа. Собранная информация из ЕИС позволяет оценить не только производственные мощности конкурентов, себестоимость выпускаемого ими продукта, но также понять примерную логику их поведения в предыдущих торгах. На основании такого анализа появляется возможность понять, будет ли конкурент участвовать в объявленном конкурсе и спрогнозировать нижний порог его цены.

Для сбора информации необходимо проанализи-

ровать все предыдущие конкурсы по рассматриваемому продукту, которые были проведены, и сгруппировать их по конкурентам. На основании такого анализа ЕИС можно собрать следующую информацию по каждому конкуренту:

1. Наименование Заказчика.

Необходимо оценить, с какими Заказчиками работает конкурент. Если все его контракты преимущественно заключены с одним и тем же Заказчиком, то вероятность его участия в объявленном конкурсе таким Заказчиком будет значительно выше, что также может повлиять и на его поведение в борьбе за контракт.

Предпочтения конкурента при выборе конкурса по критерию «Наименование Заказчика» может быть связано с престижностью Заказчика, а также может присутствовать некий картельный сговор.

2. Длительность контракта.

Длительность контракта может служить привлекательным фактором, так как позволяет обеспечить исполнителя работой на длительный срок. Следовательно, борьба за такой конкурс будет более жесткая, и снижение по цене может быть больше, по сравнению с другими контрактами. Также срок поставки необходимо учитывать и для того, чтобы учесть изменение цен во времени (инфляцию в течение периода действия контракта).

3. Объем закупки.

С одной стороны, большой объем закупки делает конкурс более привлекательным, так как позволяет обеспечить исполнителя большим заказом и в большинстве случаев снизить себестоимость производимой продукции. С другой стороны, производственные мощности исполнителя не всегда могут обеспечить выполнение такого контракта в установленные сроки. Поэтому необходимо оценить зависимость поведения конкурента с учетом влияния данного фактора.

4. Срок поставки по контракту.

Зачастую требуемый по условиям конкурса срок поставки товара не соответствует длительности производственного цикла данного товара. Это означает, что либо данный товар должен уже находиться на складах исполнителя, либо производственные возможности исполнителя позволяют выполнить условия контракта в установленный срок, либо исполнитель осознанно изначально закладывает штрафные пени в свою стоимость за задержку поставки товара и забирает контракт.

5. Условия поставки.

Большинство объявленных конкурсов, кроме поставки самого продукта, требуют его доставку, наладку, запуск, подготовку необходимых лицензий и сертификатов и т.д. Следовательно, условия поставки напрямую влияют на стоимость контракта и на возможность участия в конкурсе.

6. Срок отсрочки платежа по контракту.

Чаще всего исполнитель получает деньги за контракт после его выполнения, поэтому ему необходимо вкладывать свои или заемные деньги.

7. Финансовое обеспечение конкурса.

Каждый конкурс может включать финансовое обеспечение по следующим пунктам:

- обеспечение заявки;
- обеспечение исполнения контракта;
- обеспечение гарантийных обязательств;
- требование банковского и (или) казначейского сопровождения контракта.

Все это может значительно влиять на участие в конкурсе, так как вынуждает «замораживать» оборотные средства на обеспечение контракта и гарантийные обязательства, поэтому такие затраты, как правило, также закладываются в стоимость контракта.

8. Данные о приемке товаров по контракту.

По данным Акта приёмки и другим документам можно оценить фактические сроки выполнения контракта. На основании такой информации может быть понятна длительность производственного цикла товаров у конкурентов, закладывались ли штрафные пени на превышение сроков поставки и т.д.

9. Количество участников конкурса.

Если на конкурс вышел только один участник, то естественно предположить, что снижения по цене не будет или будет на небольшой процент.

10. Начальная максимальная цена контракта (НМЦК).

11. Цена заключенного контракта.

Для наглядного представления собранной информации по каждому конкуренту целесообразно все данные представить в виде **табл. 1**.

Следует отметить, что все данные, представленные в **табл. 1**, – это фактические данные, которые можно найти в единой информационной системе госзакупок. На основании такой информации по всем конкурентам можно провести анализ соответствия

конкурентов условиям нового объявленного конкурса и выбрать потенциальных участников.

Далее необходимо спрогнозировать минимальную пороговую цену, которую может предложить конкурент в условиях объявленного конкурса.

В некоторых случаях визуальный анализ данных **табл. 1** уже дает достаточное представление о поведении конкурента. Например, несложно заметить, если он заключает договора исключительно с одним Заказчиком или цена контракта ниже НМЦК на один и тот же процент. В этом случае достаточно просто спрогнозировать с большой долей вероятности его поведение в новом конкурсе.

Если же визуально отследить явную зависимость поведения конкурента от конкретного фактора не удастся, необходимо создать многофакторную систему прогнозирования для определения цены конкурента в новом конкурсе.

Выбор метода прогнозирования зависит от нескольких факторов, которые необходимо принять во внимание в данном случае:

- глубина и количество исходных данных;
- необходимая точность прогноза;
- срочность прогноза;
- временной промежуток прогноза;
- математическая сложность;
- стабильность внешней среды;
- диапазон колебаний входных данных и т.д.

Если имеется достаточно большая история наблюдений и собрано достаточное количество данных, наиболее целесообразно построить многофакторную модель, основанную на том, что поведение конкурента, то есть его минимальная цена на конкурсе, будет иметь статистическую зависимость от нескольких факторных признаков.

Таблица 1. Шаблон таблицы представления информации по заключенным контрактам по каждому конкуренту
Table 1. Template of the table containing information about concluded contracts by every competitor

Контракт	Данные по контракту										
	Заказчик	Длительность контракта	Объем закупки	Срок поставки	Условия поставки	Срок отсрочки платежа	Финансовое обеспечение	Данные о приемке товаров по контракту	Количество участников конкурса	НМЦК	Цена контракта
1											
2											
...											
М											

В общем виде уравнение регрессии будет иметь вид

$$\Delta = f(X_1, X_2, \dots, X_n) + \varepsilon, \quad (1)$$

где Δ – прогнозируемый процент снижения от НМЦК конкурентом в объявленном конкурсе, %; n – количество рассматриваемых факторов; ε – возмущающая переменная.

Выбор уравнения множественной регрессии состоит из следующих этапов:

- отбор факторов, влияющих на цену контракта;
- выбор уравнения связи;
- определение числа наблюдений, необходимых для получения несмещенных оценок.

Чаще всего НМЦК является одним из наиболее важных факторов, который влияет на решение об участии в конкурсе, но для анализа поведения конкурентов знание только НМЦК, скорее всего, будет недостаточно, так как в этой цене изначально необходимо учесть ряд поправок.

1. Начальная максимальная цена контракта в заявке на конкурс:

$$\text{НМЦК} = \sum_{i=0}^n (V_i \cdot \Pi_i), \quad (2)$$

где V_i – количество (объем) работы (далее товара), услуги; Π_i – цена за единицу товара; n – количество наименований товаров в заявке.

Следует понимать, что при оценке НМЦК, которую Заказчик разместил на ЕИС закупки, Π_i – это не цена товара в чистом виде, а цена, в которую заложены все требования контракта. К ним относятся:

- условия поставки (доставка, упаковка, маркировка, страхование груза, таможенная очистка, погрузка/разгрузка и т.д.);
- затраты на участие в конкурсе (комиссия за победу электронной торговой площадке, комиссия банку за выдачу гарантии, расходы за доступ к документации, расходы на участие в торгах на определенный период и др.);
- финансовое обеспечение участия в конкурсе;
- сопутствующие услуги (обучение, монтаж, пусконаладочные работы, получение лицензий и др.);
- срок отсрочки платежа Заказчиком;
- налоги и пошлины;
- штраф по условиям контракта (за просрочку обязательств, ненадлежащее исполнение обязательств и т.д.).

Причем если часть этих требований можно оценить в стоимостном выражении в чистом виде на единицу товара (услуги) или контракта в целом, то другую часть можно оценить лишь косвенно. К таким требованиям следует отнести:

- обеспечение заявки;
- обеспечение исполнения контракта;

- обеспечение гарантийных обязательств;
- отсрочку платежа Заказчиком.

Обеспечительные платежи, с одной стороны, являются возвратными для Исполнителя (если не наступил случай, который должен быть покрыт по условиям данного обеспечения), с другой – оборотные средства блокируются и предприятие не имеет возможности ими распоряжаться. При больших суммах контракта блокировка денежных средств на длительный срок может являться не только неблагоприятным фактором для производственного предприятия, но и должна рассматриваться как отвлечение денег из оборота. Следовательно, предприятие должно пополнить свой оборот заемными средствами. Поэтому стоимость таких платежей, как правило, оценивается по средней ставке по кредиту на дату объявления конкурса.

Отсрочка платежа по контракту также должна оцениваться отдельно, так как предприятию-исполнителю необходимо использовать собственные средства для выполнения условий контракта. Следовательно, в случае анализа конкурентов также наиболее целесообразно использовать среднюю ставку по кредиту на дату объявления конкурса.

Тогда все затраты предприятия на выполнение требований контракта (не включающие стоимость производства самих товаров) можно представить в виде суммы:

$$З = \sum_{j=0}^k 3_j, \quad (3)$$

где 3_j – затраты предприятия на выполнение требований контракта; k – количество видов затрат на один контракт.

Для того чтобы получить начальную максимальную цену за единицу товара, нужно сначала рассчитать долю начальной максимальной цены на каждое наименование товара d_i :

$$d_i = \frac{V_i \cdot \Pi_i}{\text{НМЦК}}. \quad (4)$$

Тогда чистая максимальная цена на товар (без учета всех требований контракта), по которой Заказчик готов его купить, будет рассчитываться как

$$\Pi_i' = \frac{(\text{НМЦК} - 3) \cdot d_i}{V_i}. \quad (5)$$

2. Из ЕИС известна цена заключенного контракта ЦК.

На основании этого можно рассчитать коэффициент снижения $K_{\text{сн}}$ по формуле

$$K_{\text{сн}} = \frac{\text{НМЦК}}{\text{ЦК}}. \quad (6)$$

Поскольку $\text{ЦК} = \sum_{i=0}^n (V_i \cdot \text{Ц}_i^{\text{ЦК}})$, то можно получить,

что

$$\text{Ц}_i^{\text{ЦК}} = \frac{\text{Ц}_i}{\text{К}_{\text{сн}}}, \quad (7)$$

где $\text{Ц}_i^{\text{ЦК}}$ – цена за единицу товара, включающая все затраты по контракту.

Тогда из (7) получаем чистую цену на товар, по которой Поставщик продаст его Заказчику:

$$\text{Ц}_i^{\text{ЦК}'} = \frac{(\text{ЦК} - 3) \cdot d_i}{V_i}. \quad (8)$$

3. Следующий важный момент, который необходимо учесть, – это среднерыночная или (прайсовая) цена на товар в контракте на дату проведения конкурса. Назовем эту цену базовой ($\text{Ц}_i^{\text{баз}}$). Способ определения базовой цены будет зависеть от того, какими данными располагают в момент проведения анализа.

Необходимость определения базовой цены обусловлено тем, что от того, на сколько начальная максимальная цена на товар превышает эту базовую цену, будет зависеть и процент снижения конкурентом от НМЦК.

Относительное значение суммарной чистой цены на все позиции товаров в контракте над базовой ценой можно определить как

$$\text{К}_{\text{отн}}^{\text{баз}} = \frac{\sum_{i=0}^n \text{Ц}_i}{\sum_{i=0}^n \text{Ц}_i^{\text{баз}}}. \quad (9)$$

Таким образом, можно сделать вывод, что в качестве влияющих факторов на снижение цены конкурентом в условиях конкурса предлагается рассматривать:

- объем поставки;
- длительность контракта;
- относительное превышение суммарной чистой цены на все товары в контракте над базовой ценой.

Тогда прогнозируемая минимальная пороговая цена, до которой может опуститься конкурент в условиях объявленного конкурса, будет рассчитываться по формуле

Таблица 2. Шаблон сводной таблицы представления прогнозных цен конкурентов при участии в конкурсе
Table 2. Template of the summary table containing forecast prices of competitors taking part in a competition

Конкурент 1	Конкурент 2	...	Конкурент p	Предприятие
Цена 1	Цена 2	...	Цена p	Цена
Вероятность 1	Вероятность 2		Вероятность p	100%

$$\text{ЦК}_{\text{прогноз}} = \text{НМЦК} \cdot \left(1 - \frac{\Delta}{100\%}\right). \quad (10)$$

Далее важно оценить вероятность того, что конкурент предложит спрогнозированную нами цену на конкурсе.

Будем считать, что оценка вероятности – это показатель, который характеризует качество прогноза, то есть будет отражать, насколько полученный прогноз совпадает с истинными значениями. Для этого необходимо, используя полученную математическую зависимость (1), рассчитать ошибки по всем предыдущим конкурсам по каждому конкуренту в процентах и подставить полученные данные в формулу:

$$\text{Вероятность} = 100\% - \frac{\sum_{l=1}^m |\text{ЦК}_{\text{факт } l} - \text{ЦК}_{\text{прогноз } l}|}{\sum_{l=1}^m \text{ЦК}_{\text{факт } l}} \cdot 100\% + \gamma, \quad (11)$$

где m – количество проанализированных конкурсов; γ – поправочный коэффициент, который позволяет повысить или снизить рассчитанную вероятность на основании воздействия дополнительных факторов (устанавливается экспертно).

Зная свою пороговую цену, причем следует отметить, что вероятность предложения своей цены на конкурсе мы можем оценить в 100%, а также получив расчет прогнозной цены по каждому конкуренту и оценив вероятность ее представления, можно внести данные в **табл. 2**.

Если же воспользоваться представленными выше расчетными методами не получается, например недостаточно собранных данных, чтобы получить математическую зависимость, необходимо применять экспертные методы, которые также позволят спрогнозировать минимальную цену конкурента в конкурсе. Точность такой оценки будет значительно ниже, чем при использовании математических зависимостей.

Чтобы оценить шансы на победу в объявленном конкурсе, необходимо рассчитать процент снижения от НМЦК по каждому предполагаемому участнику конкурса по следующей формуле:

$$\text{Процент снижения}_l = 100\% \cdot \left(1 - \frac{\text{Ц}_l}{\text{НМЦК}}\right), \quad (12)$$

где Ц_l – предполагаемая минимальная пороговая цена l -го конкурента.

Ожидаемое снижение от НМЦК с учетом заданной вероятности рассчитываем по формуле

$$\text{Ожидаемое снижение}_i = \frac{\text{Процент снижения}_i \cdot \text{Вероятность}_i}{100\%}. \quad (13)$$

Далее следует определить вес выигрыша каждого игрока в процентах по формуле

$$\text{Вес выигрыша}_i = \frac{\text{Ожидаемое снижение}_i \cdot 100\%}{\sum_{l=1}^p \text{Ожидаемое снижение}_l}, \quad (14)$$

где p – количество предполагаемых участников на конкурсе.

Зная распределение весов выигрышей по всем участникам, можно сделать вывод о том, что наибольшая вероятность победы в конкурсе будет у того участника, у которого полученный по формуле (14) вес выигрыша получился максимальным.

Практическое применение разработанного подхода и полученные результаты

В качестве примера можно рассмотреть конкурс с НМЦК 651066,66 руб. [13].

На основе предварительного анализа конкурентов был сделан прогноз, что в данном конкурсе, кроме рассматриваемого предприятия, примут участие две организации, причем минимальная цена с заданной вероятностью каждого участника будет прогнозироваться следующим образом.

Конкурент 1 предложит цену 530000 руб. с вероятностью 95%, Конкурент 2 – 600000 руб. с вероятностью 90%. Определив минимальную цену для предприятия с учетом условий конкурса 537000 руб., по формулам (7)-(9) рассчитаем ожидаемый вес выигрыша каждого участника.

Получили следующие значения: предприятие – 41%; Конкурент 1 – 42%; Конкурент 2 – 17%.

Анализ этих значений показывает, что у Конкурента 2 шансы на выигрыш минимальны и его участие в конкурсе нецелесообразно. Шансы на победу предприятия и Конкурента 1 примерно равнозначны, что говорит о том, что их участие целесообразно. Победа будет зависеть от того, насколько точно сделан прогноз, будет ли возможность предприятия изменить решение о минимальной цене в процессе проведения конкурса, а также от азартного настроения других участников.

По факту проведения конкурса Конкурент 2 не принял в нем участие, а Победителем оказался Конкурент 1, предложив цену 530000 руб. Предприятие снизилось до цены 536744,67 руб., тем самым проиграв данный конкурс.

Важно отметить, что в данной оценке важно учитывать даже минимальное расхождение в ожидаемых весовых значениях, так как шаг аукциона может лежать в пределах от 0,5 до 5% от НМЦК.

Оценив шансы на победу в конкурсе и приняв решение об участии в нем, предприятию необходимо разработать стратегию поведения на аукционе в зависимости от поведения конкурентов. Такая прогнози-

рованная модель поведения позволит предприятию избежать импульсивных и ошибочных решений.

В качестве неоспоримого факта следует отметить, что расчет вероятности победы в конкурсе – достаточно неустойчивая величина, так как основана на большом количестве допущений и предположений, но в то же время глубокий анализ конкурентов и сравнение его результатов с собственными возможностями в любом случае помогает предприятию принять обоснованное и эффективное решение и выработать стратегию своего поведения, что позволяет производственному предприятию не только экономить затраты, связанные с участием в конкурсе, но и планировать загрузку мощностей, закупку сырья и комплектующих.

Современные информационные технологии позволяют не только собирать данные для принятия решений, но и делать прогноз, основанный на изучении поведения конкурентов более точным.

Предложенный подход позволит решить проблему оперативной загрузки производственных мощностей и эффективно распределять имеющиеся у предприятия ресурсы. В основе оперативного планирования лежит производственная программа предприятия, которая должна формироваться на основе информации об участии в конкурсе и оценке вероятности победы в нем, что позволит обеспечить выпуск продукции по заранее разработанному графику и поспособствует согласованию работы смежных подразделений.

Заключение

Эффективное управление загрузкой производственных мощностей позволяет промышленным предприятиям обрабатывающей промышленности рационально использовать имеющиеся ресурсы и вместе с тем выстраивать оптимальную систему управления, отвечающую современным условиям ведения бизнеса. Участие в госзакупках для промышленного предприятия фактически означает наличие постоянного и надежного партнера. Но при этом лицу, принимающему решение, необходимо постоянно анализировать большое количество факторов, определяющих вероятность успешного участия в конкурсах.

Предложенный подход позволяет структурировать разрозненную информацию о параметрах, определяющих вероятность успешного выигрыша, что позволит добиться увеличения доли выигранных конкурсов, а значит, роста эффективности данной меры стимулирования загрузки производственных мощностей.

Принимаемые решения касательно участия в госзакупках обуславливают долгосрочную стабильность функционирования промышленных предприятий и являются базисом для формирования общей стратегии развития.

Список источников

1. Малюков Ю.А. Государственные контракты: инвестиционное обеспечение организации производства // Компетентность / Competency (Russia). 2020. №4.

С. 19-23. DOI: 10.24411/1993-8780-2020-10404

References

2. Умнова М.Г. Модель работы организаций-поставщиков с государственным заказом и перспективы требований, рисков и мер по их регулированию // Российское предпринимательство. 2019. Т. 20. №1. С. 141-158.
3. Умнова М.Г. Оценка рисков компаний-поставщиков при участии в госзакупках // Экономика, предпринимательство и право. 2019. Т. 9. №4. С. 567-578.
4. Титов В.В., Безмельницын Д.А. Интеграция стратегического планирования и операционной деятельности на предприятии на основе оптимизационного моделирования // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Социально-экономические науки. 2015. Т. 15. Вып. 1. С. 123-130.
5. Скорость и уровень загрузки производственных мощностей в условиях реализации стратегии импортозамещения в России / Развадовская Ю., Ложникова А.В., Шевченко И.К., Самонова К.В. // Journal of Economic Regulation. 2015. Т. 6. №3. С. 61-72.
6. Киреева Н.В., Малышев Е.А., Горшенин В.П. Обоснование эффективности загрузки производственных мощностей на основе ТВС-метода управления затратами // Вестник Забайкальского государственного университета. 2013. №10. С. 123-133.
7. Конева О.И., Дорошенко Ю.А. Методические аспекты выбора операционной стратегии промышленного предприятия // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. №1. С. 101-105.
8. Соловейчик К.А., Салкуцан С.В., Аркин П.А. Процессы управления наукоемкими производствами в машиностроении. СПб.: Политех-Пресс, 2018. 438 с.
9. Афанасьев А.А., Пономарева О.С. Макроэкономическая производственная функция России и оценка предельной нормы технологического замещения в беспрецедентных социально-экономических реалиях 2020-2022 гг. // Бизнес-информатика. 2022. Т. 16. №4. С. 82-104.
10. Хвостикова В.А. Модель выбора метода управления затратами промышленного предприятия // Организатор производства. 2017. Т. 25. №4. С. 44-56.
11. Развадовская Ю.В., Ханина А.В. Оценка производственного потенциала отраслевого промышленного сектора экономики: детерминанты, индикаторы, тенденции // Экономический анализ: теория и практика. 2017. Т. 16. Вып. 1. С. 69-81.
12. Ложникова А.В., Розмаинский И.В., Развадовская Ю.В. Техника как национальное богатство России: институциональные аспекты, «статистические иллюзии» и проблемы прогнозирования // Journal of Institutional Studies. 2015. Т. 7. №4. С. 60-85.
13. Официальный сайт Единой информационной системы в сфере закупок. URL: <https://zakupki.kontur.ru/0318100067223000163> (дата обращения: 26.09.2023).
1. Malyukov Yu.A. State contracts: Investment support for production organization. *Kompetentnost* [Competency (Russia)]. 2020;(4):19-23. (In Russ.) DOI: 10.24411/1993-8780-2020-10404
2. Umnova M.G. A model of dealing of suppliers with state orders and prospects for requirements, risks and measures regarding their control. *Rossiiskoe predprinimatelstvo* [The Russian Journal of Entrepreneurship]. 2019;20(1):141-158. (In Russ.)
3. Umnova M.G. Assessing risks of suppliers, when taking part in public procurement. *Ekonomika, predprinimatelstvo i pravo* [Economics, Entrepreneurship and Law]. 2019;9(4):567-578. (In Russ.)
4. Titov V.V., Bezmelnitsyn D.A. Integrating strategic planning and operating activities at enterprises by applying optimization modeling. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sotsialno-ekonomicheskie nauki* [Vestnik of Novosibirsk State University. Series: Social and Economics Sciences]. 2015;15(1):123-130. (In Russ.)
5. Razvadovskaya Yu., Lozhnikova A.V., Shevchenko I.K., Samonova K.V. Speed and level of capacity utilization in terms of the import substitution strategy in Russia. *Journal of Economic Regulation*. 2015;6(3):61-72. (In Russ.)
6. Kireeva N.V., Malyshev E.A., Gorshenin V.P. Providing a rationale for efficiency of production capacity utilization based on the TBC method of cost management. *Vestnik Zabaikalskogo gosudarstvennogo universiteta* [Vestnik of Transbaikal State University]. 2013;(10):123-133. (In Russ.)
7. Koneva O.N., Doroshenko Yu.A. Methodological aspects of choosing an operating strategy of an industrial enterprise. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova* [Bulletin of Shukhov Belgorod State Technological University]. 2013;(1):101-105. (In Russ.)
8. Soloveichik K.A., Salkutsan S.V., Arkin P.A. *Protssy upravleniya naukoemkimi proizvodstvami v mashinostroenii* [Processes of managing knowledge-intensive facilities in mechanical engineering]. Saint Petersburg: Politekh-Press, 2018, 438 p. (In Russ.)
9. Afanasiev A.A., Ponomareva O.S. A macroeconomic production function of Russia and estimation of the limit rate of the technological substitution in the unprecedented social and economic realities of 2020-2022. *Biznes-informatika* [Business Informatics]. 2022;16(4):82-104. (In Russ.)
10. Khvostikova V.A. A model of choosing a cost management method for industrial enterprises. *Organizator proizvodstva* [Organizer of Production]. 2017;25(4):44-56. (In Russ.)
11. Razvadovskaya Yu.V., Khanina A.V. Assessing a production potential of an industrial sector of economy: determinants, indicators and trends. *Ekonomicheskyy analiz: teoriya i praktika* [Economic Analysis: Theory and Practice]. 2017;16(1):69-81. (In Russ.)

12. Lozhnikova A.V., Rozmainskiy I.V., Razvadovskaya Yu.V. Engineering as national wealth of Russia: institutional aspects, “statistical illusions” and difficulties in forecasting. *Journal of Institutional Studies*. 2015;7(4):60-85. (In Russ.)
13. Official website of the Unified Information System in the field of procurement. Available at: <https://zakupki.kontur.ru/0318100067223000163> (Accessed on September 26, 2023).

Поступила 20.10.2023; принята к публикации 05.12.2023; опубликована 28.03.2024
Submitted 20/10/2023; revised 05/12/2023; published 28/03/2024

Третьякова Виктория Александровна – кандидат технических наук, доцент,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.
Email: tva@bmstu.ru. ORCID 0009-0007-7812-0845

Горлачева Евгения Николаевна – доктор экономических наук, доцент,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.
Email: egorlacheva@bmstu.ru. ORCID 0000-0001-6290-8557

Viktoriya A. Tretyakova – PhD (Eng.), Associate Professor,
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia.
Email: tva@bmstu.ru. ORCID 0009-0007-7812-0845

Evgeniya N. Gorlacheva – DrSc (Econ.), Associate Professor,
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia.
Email: egorlacheva@bmstu.ru. ORCID 0000-0001-6290-8557

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.9.06
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-1-132-142



ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ АСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ ФОРМЫ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ В ДИСКОВЫХ БУНКЕРНЫХ ЗАГРУЗОЧНО-ОРИЕНТИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВАХ

Пантюхина Е.В., Васин С.А., Пантюхин О.В.

Тульский государственный университет, Тула, Россия

Аннотация. Одними из основных показателей качества технологического оборудования являются надежность, стабильность работы и производительность. На линиях автоматизированной сборки многокомпонентных изделий указанные показатели качества обеспечиваются системами автоматической загрузки собираемых компонентов (деталей, заготовок, предметов обработки), которые в большинстве случаев или поступают на производство в неориентированном положении «навалом» или теряют ориентацию на технологических переходах при выполнении операций производственного процесса. Аналогичные системы используют при контроле продукции массовых производств в инспектирующих машинах. Основным устройством таких систем является бункерное загрузочное устройство, осуществляющее ориентирование деталей. Надежное пассивное ориентирование деталей с неявной асимметрией обеспечивается путем их удаления из захватывающих органов при соблюдении следующих условий. Во-первых, конструкция захватывающих и ориентирующих органов должна способствовать тому, чтобы в верхней части бункера детали под действием силы тяжести выпадали обратно в нижнюю часть бункера – зону захвата. Во-вторых, частично запавшие в карман в неправильном положении детали должны полностью покинуть не только захватывающий орган, но и те конструктивные элементы бункерного загрузочно-ориентирующего устройства, которые участвуют в подготовке деталей к захвату. Поэтому важнейшей задачей при разработке надежных конструкций бункерных загрузочно-ориентирующих устройств для деталей с неявной асимметрией является разработка математических моделей процесса пассивного ориентирования, позволяющих определить условия, при которых неориентированная деталь должна полностью удалиться из захватывающих и ориентирующих органов. В работе представлена методика построения математической модели пассивного ориентирования на примере ступенчатой цилиндрической детали с использованием уравнений Лагранжа второго рода и их численным решением, позволяющая оценить условия надежной работы бункерного загрузочно-ориентирующего устройства с радиальными прямоугольными карманами и пазами в виде гребенки.

Ключевые слова: надежность автоматической загрузки, бункерное загрузочно-ориентирующее устройство, автоматическая загрузка, автоматическая сборка, ориентирование деталей

© Пантюхина Е.В., Васин С.А., Пантюхин О.В., 2024

Для цитирования

Пантюхина Е.В., Васин С.А., Пантюхин О.В. Обеспечение надежного ориентирования асимметричных деталей формы тел вращения в дисковых бункерных загрузочно-ориентирующих устройствах // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №1. С. 132-142. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-132-142>



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

ENSURING A RELIABLE ORIENTATION OF ASYMMETRIC PARTS OF THE FORM OF ROTATION BODIES IN DISK HOPPER FEEDING AND ORIENTING DEVICES

Pantukhina E.V., Vasin S.A., Pantukhin O.V.

Tula State University, Tula, Russia

Abstract. One of the main indicators of the quality of technological equipment is reliability, stability and performance. These quality indicators applied for the lines of automated assembly of multicomponent products are provided by systems for automatic feeding of components to be assembled (parts, blanks, machining items), which are mostly either delivered to production in a non-oriented position in bulk, or lose their orientation at process steps, when performing operations of the production process. Similar systems are used in the product control of mass production in inspection machines. A main device of such systems is a hopper feeding device that orients parts. A reliable passive orientation of implicitly asymmetric parts is ensured by removing them from grippers subject to the following conditions. Firstly, the design of the gripping and orienting elements should ensure that the parts in the upper part of the hopper fall back by gravity into the lower part of the hopper, the gripping zone. Secondly, the parts partially sunk into the pocket in the wrong position should completely leave not only the gripping element, but also those structural elements of the hopper feeding and orienting device that are involved in preparing the parts for gripping. Therefore, the most important task in designing reliable structures of hopper feeding and orienting devices for implicitly asymmetric parts is to develop mathematical models of the passive orientation process to determine the conditions, when a non-oriented part should be completely removed from the gripping and orienting elements. The paper presents a method of building a mathematical model of passive orientation for a stepped cylindrical part using Lagrange equations of the second kind and their numerical solution to assess the conditions for a reliable operation of the hopper feeding and orienting device with radial rectangular pockets and grooves in the form of a rack.

Keywords: reliability of automatic feeding, hopper feeding and orienting device, automatic feeding, automatic assembly, orientation of parts

For citation

Pantukhina E.V., Vasin S.A., Pantukhin O.V. Ensuring a Reliable Orientation of Asymmetric Parts of the Form of Rotation Bodies in Disk Hopper Feeding and Orienting Devices. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 1, pp. 132-142. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-132-142>

Введение

Надежность механических дисковых бункерных грузочно-ориентирующих устройств (БЗУ) должна обеспечиваться рациональной конструкцией захватывающих и ориентирующих органов. При этом в захватывающий орган должна полностью запасть только та деталь, которая находится в правильном положении, вероятность ее западания должна быть максимальной, а размеры захватывающего органа не должны позволить одновременному западанию в него нескольких деталей; детали, находящиеся в неправильном положении, могут лишь частично запасть в карман, а величина их погружения должна быть достаточной для того, чтобы в зоне ориентирования такие детали покинули захватывающие органы одним из возможных способов [1].

Существующие средства автоматической загрузки, используемые ранее для деталей формы тел вращения с явной асимметрией, перестали эффективно функционировать для деталей с неявной асимметрией по торцам, так как перестали обеспечиваться требуемая производительность, характеризуемая количеством выданных из БЗУ правильно сориентированных деталей в единицу времени, и надежность, характеризуемая полным отсутствием выданных из БЗУ неориентированных деталей [2].

Чтобы частично запавшие в карман в неправильном положении детали полностью покинули захватывающие органы и участвующие в подготовке деталей к захвату конструктивные элементы БЗУ, для обеспечения надежности необходимо определить граничные условия и разработать математические модели процесса пассивного ориентирования деталей. Это позволит определить кинематические параметры БЗУ, при которых неориентированная деталь успеет удалиться из захватывающих и ориентирующих органов.

Анализ научных работ в данной области показал, что все они посвящены исследованию процессов активного ориентирования асимметричных деталей на вертикальных неподвижных опорах сначала в стационарных системах загрузки [3-5], а позже и в роторных с помощью гравитационных ориентаторов [6, 7]. Первые математические модели движения деталей строились на основе принципа Д'Аламбера, а позже – в форме уравнений Лагранжа второго рода. Из-за сложности решений полученных дифференциальных уравнений время ориентирования было определено приближенно после их упрощения. В работах [8, 9] рассмотрено применение уравнений Лагранжа второго рода для математического описания вращательного движения детали вокруг края диска в БЗУ с зубьями и кольцевым ориентатором без учета сил трения о боковую поверхность

кармана. Математическая модель пассивного ориентирования, при котором деталь полностью удалялась из кармана с фаской на вращающемся диске, приведена в работах [10, 11], где границы интегрирования для каждого этапа определялись графически для деталей с конкретными геометрическими параметрами, а из-за сложности функций, описывающих зависимости координат центра масс и координат приложения действующих на деталь сил от обобщенной координаты, они были преобразованы к линейным функциям.

Цель настоящей работы – разработка математической модели процесса пассивного ориентирования деталей при их полном удалении из органов захвата и ориентирования с учетом всех действующих на деталь сил на примере БЗУ с радиальными прямоугольными карманами и пазами в виде гребенки [12] для ступенчатых предметов обработки с неявной асимметрией, имеющих различные геометрические параметры. Решение поставленных задач базируется на использовании уравнений Лагранжа второго рода и их численном решении.

Общая концепция построения математической модели пассивного ориентирования деталей

Пассивное ориентирование начинает реализовываться в некоторой зоне, называемой зоной ϕ_0 пассивного ориентирования и характеризуемой диапазоном от $+\psi_0$ до $-\psi_0$, при этом деталь должна полностью удалиться из органов захвата и ориентирования за время, в течение которого вращающийся диск с неправильно расположенной в кармане деталью проходит зону ϕ_0 .

Для построения математической модели процесса пассивного ориентирования деталей в рассматриваемом БЗУ предлагается методика, включающая стадии, показанные на рис. 1.

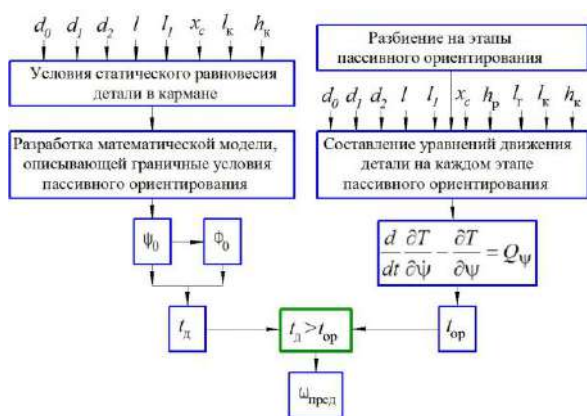


Рис. 1. Методика построения математических моделей пассивного ориентирования деталей
Fig. 1. Method of building mathematical models of passive orientation of parts

Исходными данными для построения моделей являются: d_0, d_1, d_2 – внутренний диаметр и диаметры большего и меньшего торцов детали, м; l, l_1 – общая длина и длина наибольшего торца детали, м; l_k, h_k – длина и ширина кармана, м; h_p, l_p – высота паза и его длина, м.

Задача по определению начальных условий данного процесса решается с помощью уравнений статического равновесия детали в кармане БЗУ, что позволяет определить сначала угол ψ_0 , при котором начинается движение детали, а затем всю зону ϕ_0 , на протяжении которой возможно ее полное удаление. Для определения угла ψ_0 , при котором деталь начинает выпадать из кармана, необходимо выявить все действующие на деталь силы и составить условия ее статического равновесия в кармане в виде системы уравнений.

На рис. 2 представлены схемы возможных положений асимметричных деталей перед началом их пассивного ориентирования в БЗУ различной конструкции: с радиальными карманами и кольцевым ориентатором, вращающийся диск которого имеет фаску (рис. 2, а) или выполнен без фаски (рис. 2, б); с зубьями и кольцевым ориентатором при расположении детали в момент захвата (рис. 2, в) и когда деталь принимает устойчивое положение на пути к зоне пассивного ориентирования (рис. 2, г); с тангенциальными карманами и гребенкой, когда вращающийся диск начинает переворачивать деталь и приводит её к вертикальному положению (рис. 2, д) до момента начала пассивного ориентирования (рис. 2, е).

Полученные значения ψ_0 и ϕ_0 являются начальными условиями для решения следующих задач: определение общего времени $t_{ор}$ полного удаления детали из кармана и паза диска, наклоненного к горизонту под углом α , с помощью уравнений Лагранжа второго рода (T – кинетическая энергия системы, Дж; $\psi, \dot{\psi}, Q$ – обобщенные координаты, скорость и сила) (см. рис. 1) и времени $t_{д}$, в течение которого диск проходит зону ϕ_0 .

Так как процесс пассивного ориентирования состоит из нескольких этапов в зависимости от конструкции захватывающих и ориентирующих органов БЗУ, то необходимо составить дифференциальные уравнения для каждого этапа. Решение полученных уравнений численными методами можно реализовывать в различных средах, что позволит сначала определить время движения t_i детали на каждом этапе, а затем найти общее время $t_{ор}$ пассивного ориентирования.

Сравнение значений $t_{ор}$ и $t_{д}$ позволит определить диапазоны граничных значений угловой скорости ω , при которых из БЗУ не будут выдаваться неправильно сориентированные детали. Полученные значения необходимо учитывать при выборе окружной скорости захватывающих органов, отдавая предпочтения только тем ее рабочим значениям, которые не превысят предельных окружных скоростей по ориентированию.

Разработка математической модели, описывающей граничные условия пассивного ориентирования. Для решения поставленной задачи, основной целью которой является обеспечение надежности функционирования БЗУ при пассивном ориентировании предметов обработки с неявной асимметрией, оценим и проведем исследование граничных условий данного процесса. Схемы расположения в кармане ступенчатой цилиндрической детали перед началом ориентирования представлены на рис. 3.

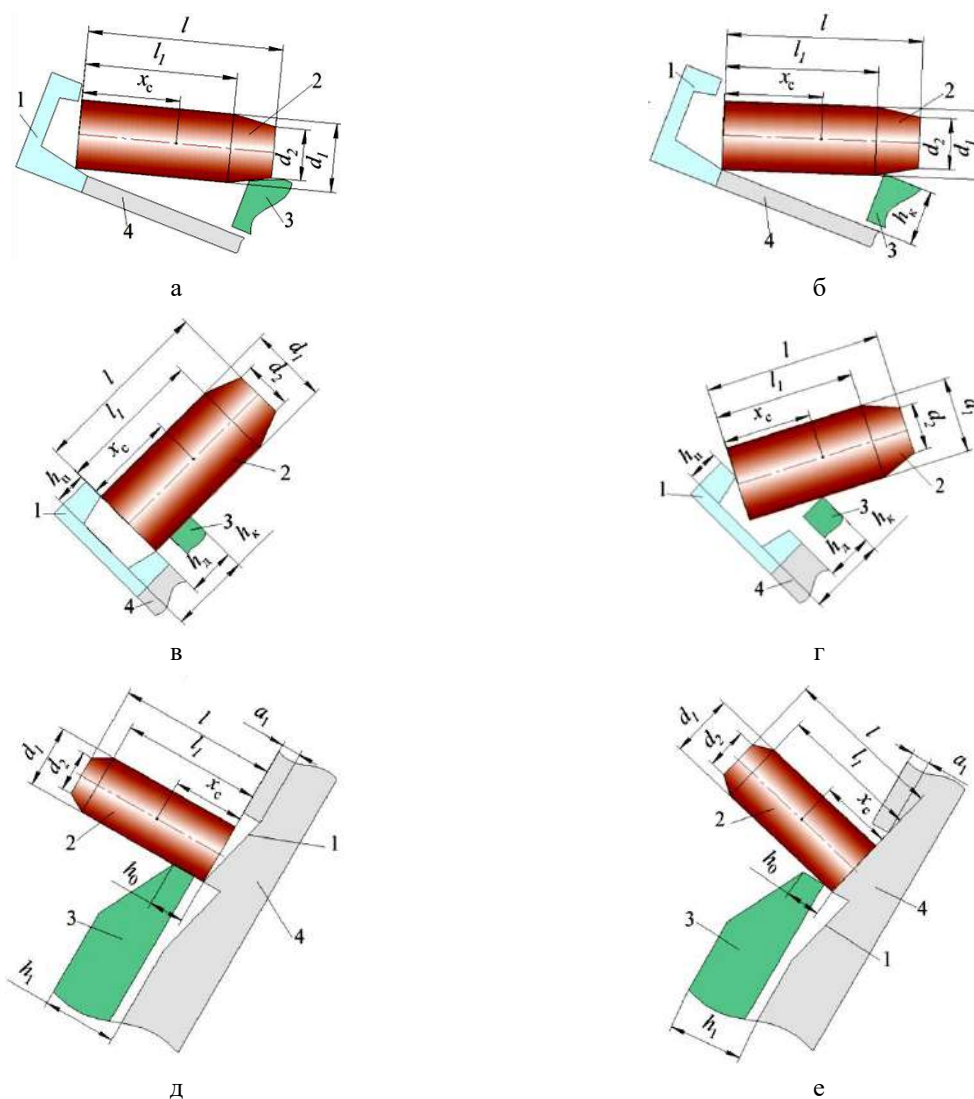


Рис. 2. Различные варианты схем пассивного ориентирования деталей: 1 – ориентирующий элемент (кольцевой ориентатор или гребенка); 2 – предмет обработки; 3 – вращающийся диск; 4 – неподвижное основание
 Fig. 2. Versions of passive orientation schemes for parts: 1 is an orientating element (a ring orientating device or rack); 2 is a part under machining; 3 is a rotating disk; 4 is a fixed base

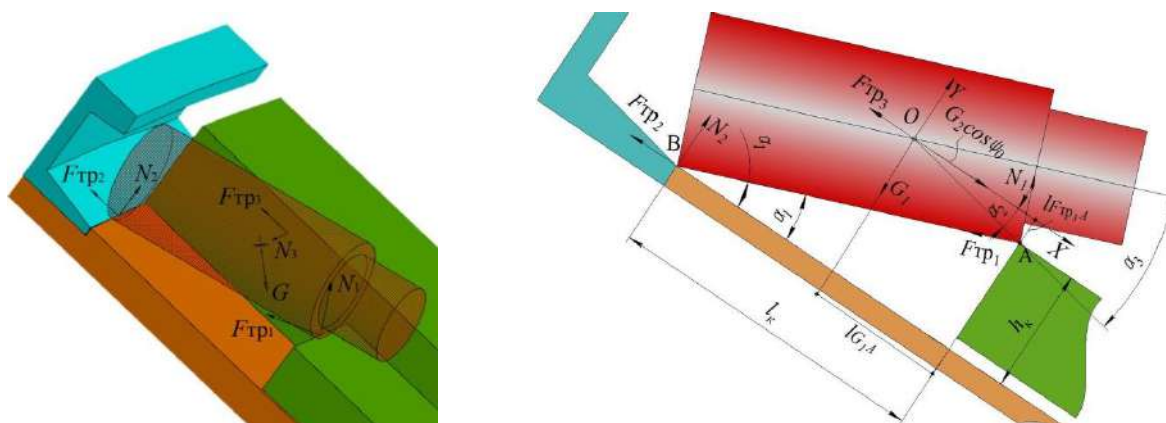


Рис. 3. Деталь в кармане и действующие на нее силы
 Fig. 3. The part in the pocket and the acting forces

Составив систему уравнений, описывающих условия равновесия детали в кармане, и выполнив преобразования, получим выражение для определения угла ψ_0 :

$$\psi_0 = \arcsin \frac{-\mu K + \sqrt{\mu^2 + 1 - K^2}}{\mu^2 + 1}, \quad (1)$$

где μ – коэффициент трения детали о стенки кармана.

$$K = \frac{\frac{\mu \cdot \cos \alpha \cdot l_{G1A}}{l_k + \mu \cdot h_k} + \frac{\cos \alpha \cdot (l_k - l_{G1A}) \cdot (\sin \alpha_1 + \mu \cos \alpha_1)}{l_1}}{\sin \alpha + \frac{\mu \cdot \sin \alpha \cdot l_{F_{TP3A}}}{l_k + \mu \cdot h_k} - \frac{\sin \alpha \cdot (h_k + l_{F_{TP3A}}) \cdot (\sin \alpha_1 + \mu \cos \alpha_1)}{l_1}}$$

$$l_{G1A} = f \cdot \cos(\alpha_3 - \alpha_1 - \alpha_2), \quad f = \sqrt{n^2 + b^2 + 2nb \cdot \cos(\alpha_3 + \beta)},$$

$$n = \sqrt{(l_1 - x_c)^2 + \frac{d_1^2}{4}}, \quad \alpha_3 = \arctan\left(\frac{l_1}{2(l_1 - x_c)}\right),$$

$$l_{F_{TP3A}} = f \cdot \sin(\alpha_3 - \alpha_1 - \alpha_2), \quad \alpha_1 = \arctan\left(\frac{h_k}{l_1}\right) - \alpha_0,$$

$$\alpha_2 = \arccos\left(\frac{n^2 + f^2 - b^2}{2nf}\right), \quad \alpha_0 = \arccos\left(\frac{h_k^2 + 2l_1^2 - b^2}{2l_1 \cdot \sqrt{h_k^2 + l_1^2}}\right),$$

$$b = \sqrt{(l_1 \cos \beta)^2 + h_k^2} - l_1 \cos \beta,$$

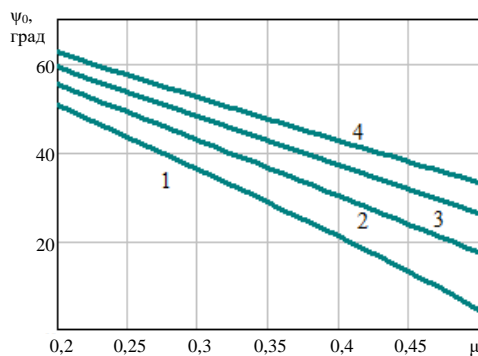
$$\beta = \arcsin\left(\frac{d_1 - d_2}{2\sqrt{0,25 \cdot (d_1 - d_2)^2 + (l - l_1)^2}}\right).$$

Угол ψ_0 , определяемый выражением (1) для ступенчатых деталей, может быть также определен с помощью графиков, приведенных на рис. 4.

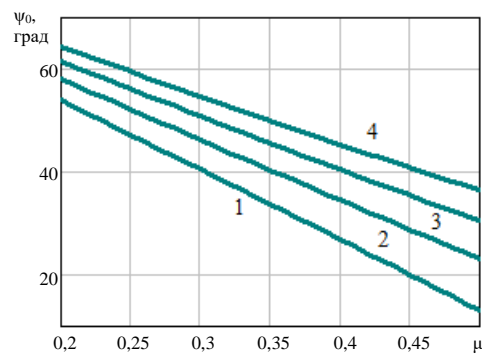
Угол, при котором начинается пассивное ориентирование, составляет от 53-65 до 4-40° и является начальным условием процесса.

Этапы пассивного ориентирования и уравнения движения детали на каждом из них. Положение ступенчатой детали в начале и конце каждого этапа показано на рис. 5. Сначала деталь движется по основанию кармана (этап 1, I-II), потом поворачивается на опоре А (этап 2, II-III) и движется по пазу сначала по начальному участку гребенки (этап 3, III-IV) и до конца гребенки (на рис. 5 не показано) до полного удаления из него. При составлении уравнений движения принимаем допущения: не учитываем рассеянную энергию и демпфирование при соударениях детали о стенки кармана.

Расчетные схемы для нахождения координат центра масс детали и обобщенной силы на всех этапах ее движения представлены на рис. 6.



а



б

Рис. 4. Зависимости угла ψ_0 от коэффициента трения для ступенчатых деталей с $l/d_1 = 3$ (а) и $l/d_1 = 4$ (б) при: 1 – $\alpha = 40^\circ$; 2 – $\alpha = 45^\circ$; 3 – $\alpha = 50^\circ$; 4 – $\alpha = 55^\circ$

Fig. 4. Dependence between angle ψ_0 and a coefficient of friction for stepped parts with $l/d_1 = 3$ (а) and $l/d_1 = 4$ (б) at 1 – $\alpha = 40^\circ$; 2 – $\alpha = 45^\circ$; 3 – $\alpha = 50^\circ$; 4 – $\alpha = 55^\circ$

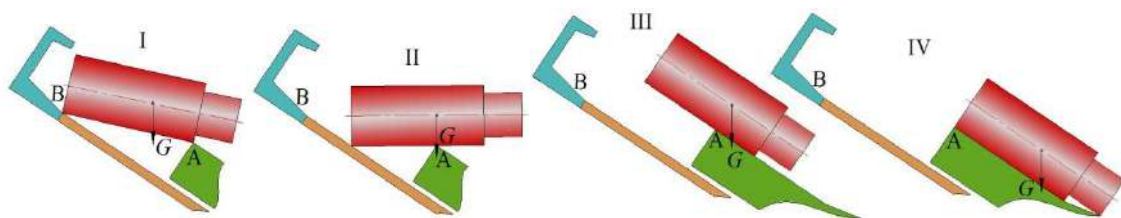


Рис. 5. Этапы пассивного ориентирования детали
Fig. 5. Stages of passive orientation of the part

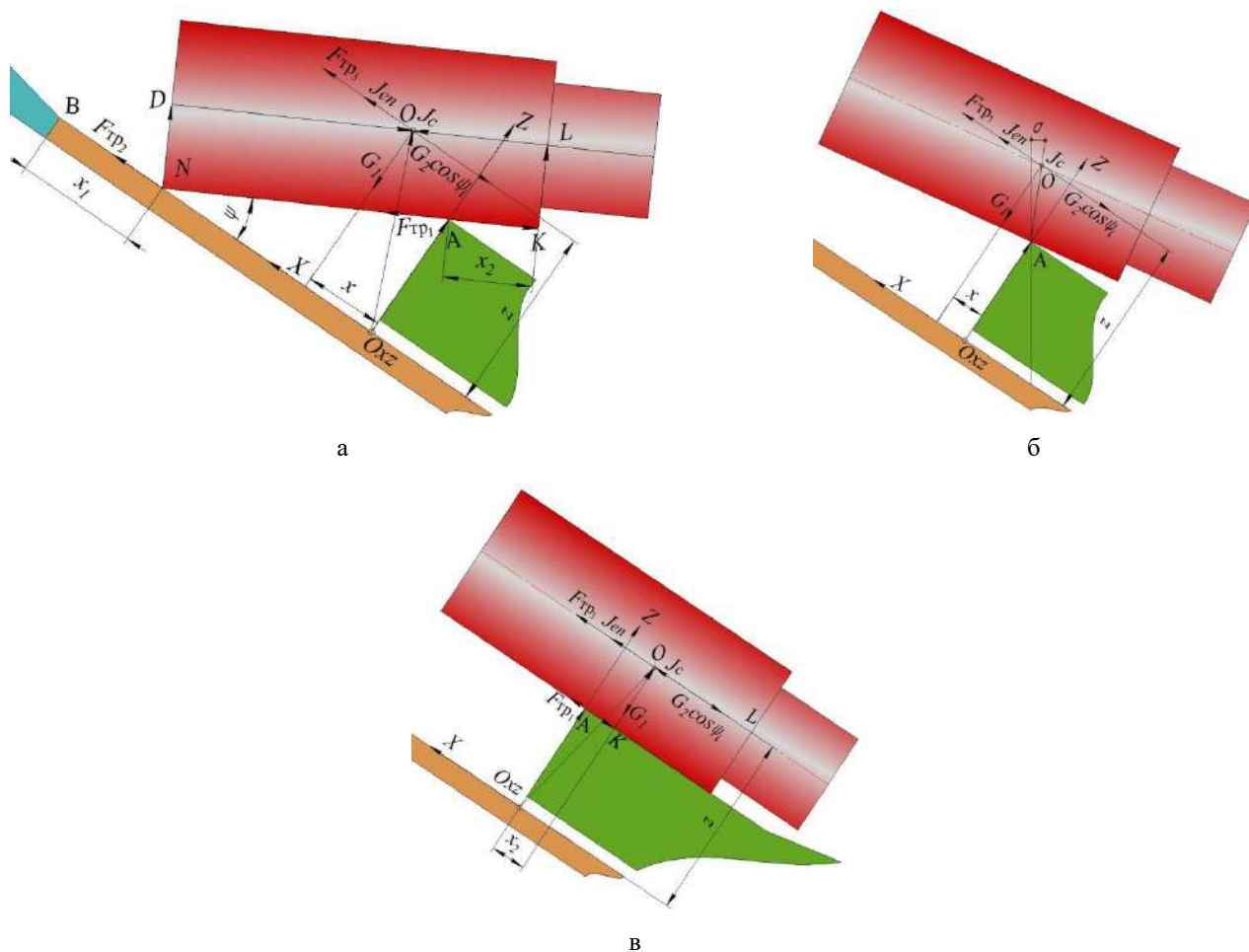


Рис. 6. Схемы для нахождения координат центра масс детали и обобщенной силы на этапах 1 (а), 2 (б) и 3 (в)
 Fig. 6. Diagrams for finding coordinates of the part center of mass and generalized force at stages 1 (a), 2 (б) and 3 (в)

Обобщенной координатой на *этапе 1* будем считать угол ψ . Тогда уравнения координат центра масс и приложений сил трения $F_{тр2}$ и $F_{тр1}$ запишем в следующем виде:

$$x_o(\psi) = \frac{d_1}{2} \sin \psi - x_c \cos \psi + (l_k - x_1);$$

$$z_o(\psi) = h_k + x_2 \sin \psi + \frac{d_1}{2} \cos \psi - (l_k - x_c) \sin \psi;$$

$$z_2 = 0; \quad x_2(\psi) = x_o(\psi) - 0,5d_1 \sin \psi + x_c \cos \psi;$$

$$x_1 = 0; \quad z_1 = h_k,$$

где $x_2 = l_1 - \frac{h_k}{\sin \psi}$, $x_1 = l_1 - (l_1 - x_2) \cos(\psi)$ (см. рис. 6, а).

Левая часть уравнения движения

$$\ddot{\psi} J_{np} + \dot{\psi} \frac{d \left\{ m \left[\left(\frac{dx_o}{d\psi} \right)^2 + \left(\frac{dz_o}{d\psi} \right)^2 \right] \right\}}{dt} - \frac{\dot{\psi}^2}{2} \frac{md \left(\frac{dx_o}{d\psi} \right)^2}{d\psi} + \frac{\dot{\psi}^2}{2} \frac{md \left(\frac{dz_o}{d\psi} \right)^2}{d\psi}, \quad (2)$$

а обобщенная сила

$$\left[\left(G_2 \sin \psi_i - 2m\omega \dot{\psi} \sqrt{\left(\frac{\delta x}{\delta \psi} \right)^2 + \left(\frac{\delta z}{\delta \psi} \right)^2} \right) \mu - G_2 \cos \psi_i + m\omega^2 (R + x_o(\psi)) \right] \frac{\delta x}{\delta \psi} - \left[\left(G_2 \sin \psi_i - 2m\omega \dot{\psi} \sqrt{\left(\frac{\delta x}{\delta \psi} \right)^2 + \left(\frac{\delta z}{\delta \psi} \right)^2} \right) \mu + \left(+m\omega^2 (R_1 + x_o(\psi)) - G_2 \cos \psi_i + G_1 \cdot j \right) \mu \right] \frac{\delta x_2}{\delta \psi} - G_1 \frac{\delta z}{\delta \psi} - \frac{2m\mu \dot{\psi} \frac{d^2 x}{d\psi^2} + \frac{d^2 z}{d\psi^2}}{j - \mu} \frac{\delta x}{\delta \psi}, \quad (3)$$

где $j = \frac{\mu \cdot \cos \psi + \sin \psi}{\cos \psi - \mu \cdot \sin \psi}$, начальный угол определяется

как $\psi = \arctan \left(\frac{h_k}{l_1} \right)$, а конечный угол из выражения

$$\psi = \sqrt{x_c^2 + 0,25d_1^2} \cdot \sin(\alpha_2 + \psi_k) - h_k = \cos \alpha_1 \cdot \frac{d_1}{2 \cos(\alpha_1 - \psi_k)} \quad \text{в}$$

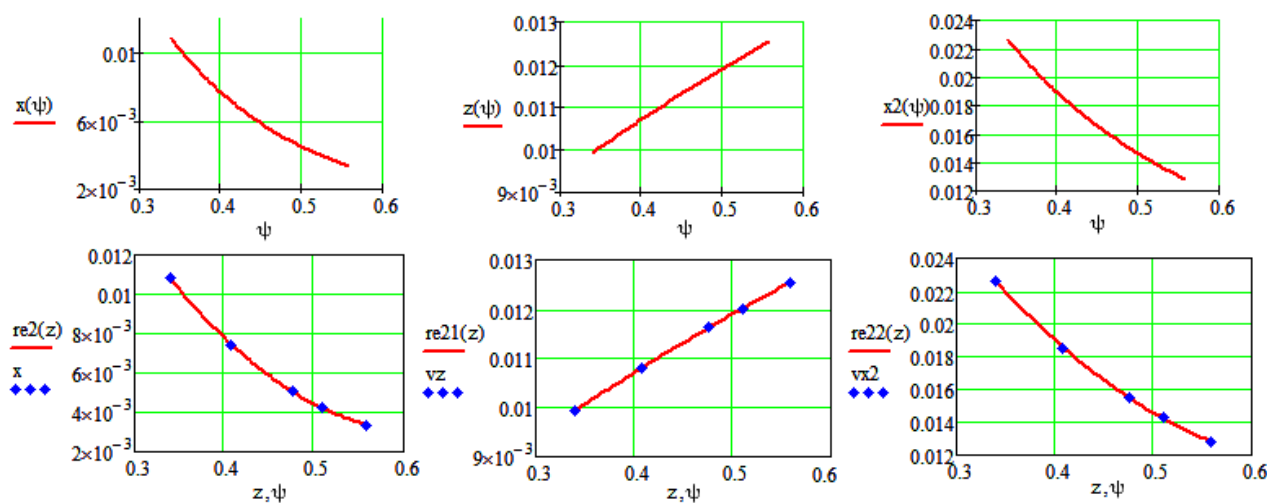
MathCad с помощью операторов *Given* и *Find* (где

$$\alpha_2 = \arcsin \frac{d_1}{2\sqrt{x_c^2 + 0,25d_1^2}}; \quad \alpha_1 = \arcsin(\cos \psi_0 \cdot \sin \alpha).$$

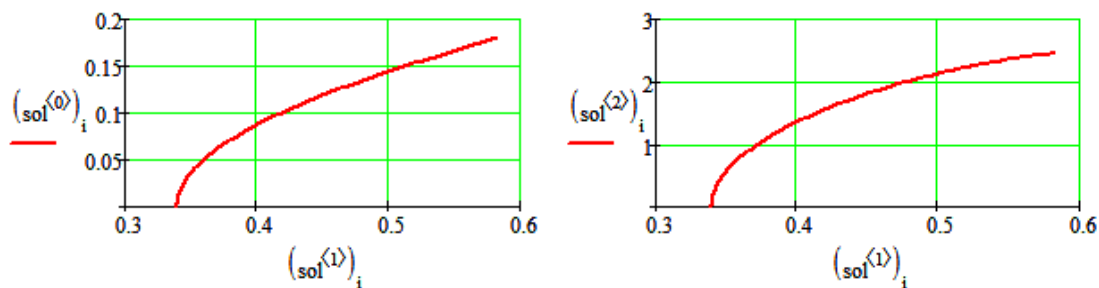
Решение дифференциальных уравнений движения численными методами для каждого этапа реализовано в разработанной программе в среде *MathCad* для ступенчатых деталей с $l/d_1 = 3$. На **рис. 7** приведены результаты аппроксимации координат центра масс детали и приложения силы $F_{\text{тр}2}$ в виде полиномов второй степени и численного решения дифференциального уравнения движения, где по оси X показана обобщенная координата, по оси Y – время и угловая скорость.

На *этапе 2* движения детали в качестве обобщенной координаты принимаем угол поворота центра его масс σ на опоре A (см. **рис. 6, б**), тогда координаты центра ее масс

$$x_o(\sigma) = \frac{d_1 \sin(\alpha_1 - \sigma)}{2 \cos(\alpha_1 - \psi_k)}, \quad z_o(\sigma) = \frac{d_1 \cos(\alpha_1 - \sigma)}{2 \cos(\alpha_1 - \psi_k)} + h_k.$$



а



б

в

Рис. 7. Графики зависимостей для этапа 1 координат центра масс и координаты силы $F_{\text{тр}2}$ от обобщенной координаты и их аппроксимирующие функции (а) и результаты численного решения дифференциального уравнения движения времени (б) и угловой скорости (в) от обобщенной координаты

Fig. 7. Plots for stage 1 of the center of mass coordinates and force $F_{\text{тр}2}$ coordinates for the generalized coordinate and their approximating functions (a) and the results of the numerical solution of the differential equation of time motion (б) and angular velocity (в) for the generalized coordinate

Дифференциальное уравнение движения детали на этапе 2 имеет вид

$$I_o \ddot{\sigma} = \left(G_2 \sin \psi_i - 2m\omega \sqrt{\left(\frac{\delta x}{\delta \sigma}\right)^2 + \left(\frac{\delta z}{\delta \sigma}\right)^2} \right) \cdot \mu \frac{\delta x}{\delta \sigma} + m\omega^2 (R_1 + x_{o_3}(\sigma)) \frac{\delta x}{\delta \sigma} - G_2 \cos \psi_i \frac{\delta x}{\delta \sigma} - G_1 \frac{\delta z}{\delta \sigma}, \quad (4)$$

границы которого задаются начальным углом $\sigma_0 = 0$ и конечным углом $\psi_k = \psi$.

Результаты аппроксимации координат центра масс в виде полиномов второй степени и численного решения дифференциального уравнения приведены на **рис. 8**.

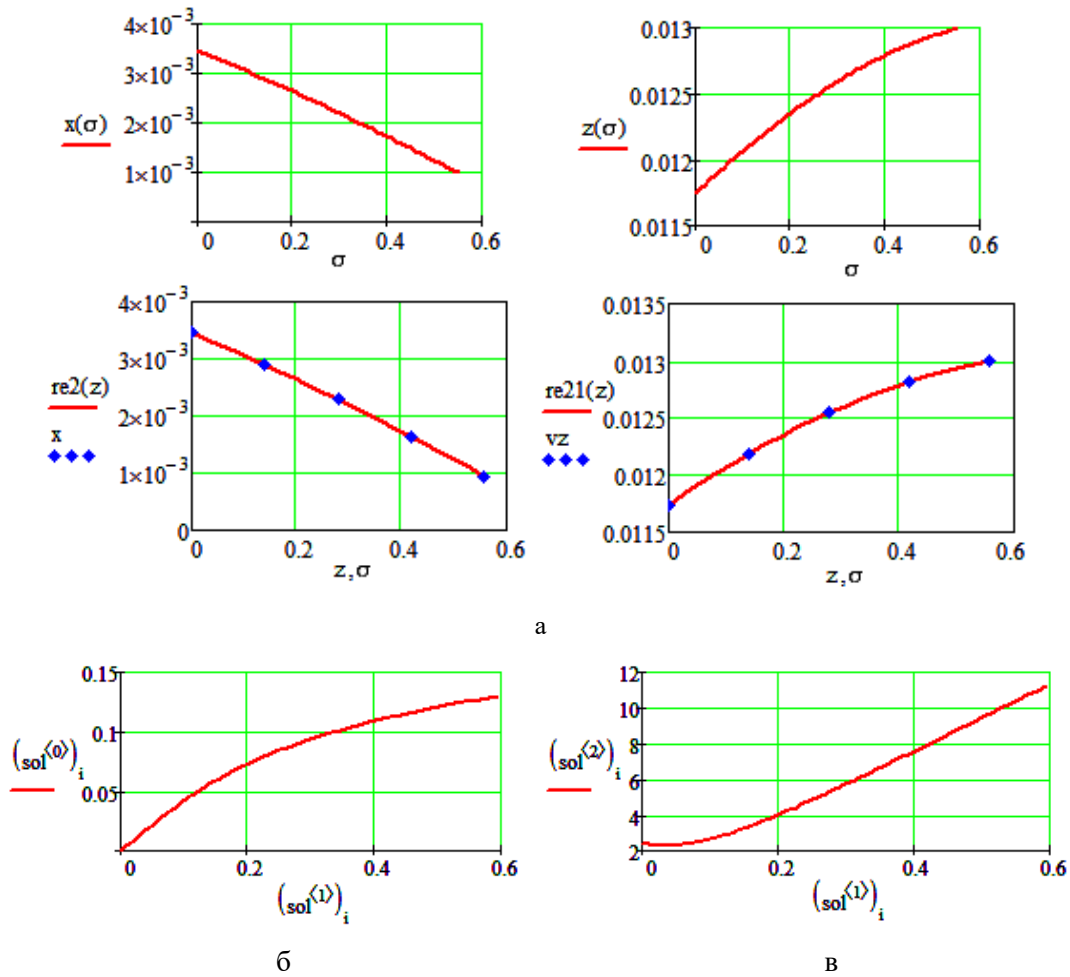


Рис. 8. Графики зависимостей для этапа 2 координат центра масс от обобщенной координаты и их аппроксимирующие функции (а) и результаты численного решения дифференциального уравнения движения времени (б) и угловой скорости (в) от обобщенной координаты

Fig. 8. Plots for stage 2 of the center of mass coordinates for the generalized coordinate and their approximating functions (a) and the results of the numerical solution of the differential equation of time movement (б) and angular velocity (в) for the generalized coordinate

На *этапе 3* обобщенной координатой считаем расстояние x_2 от опоры A до центра масс детали по оси OX (см. **рис. 6, в**). Данный этап состоит из двух подэтапов. Начальные и конечные координаты x_2 первого из них: $x_{20} = \frac{d_1}{2} \tan(\alpha_1 - \psi)$, $x_{2k} = x_c$, а второго подэтапа: $x_{20} = x_c$ и $x_{2k} = l_r + x_c$. Зависимости координат центра масс и силы трения $F_{тр1}$ от обобщенной координаты для первого подэтапа: $x_o(x_2) = -x_2$, $z_o(x_2) = h_k + 0,5d_1$, $x_1(x_2) = -x_2$, $z_1(x_2) = h_k$, а для второго подэтапа: $x_o(x_2) = -x_2$, $z_o(x_2) = h_k + 0,5d_1 + (x_2 - x_c) \tan \alpha_p$ и $x_1(x_2) = -x_2$, $z_1(x_2) = h_k + (x_2 - x_c) \tan \alpha_p$, где $\alpha_p = \arctan \frac{h_p}{l_r}$ – угол наклона гребенки, град.

Уравнения на первом (5) и втором (6) подэтапах движения детали запишем в виде

$$\ddot{x}_2 m = \left(G_2 (\mu \sin \varphi - \cos \varphi) - 2m\omega \sqrt{\left(\frac{\delta x}{\delta x_2}\right)^2 + \left(\frac{\delta z}{\delta x_2}\right)^2} + m\omega^2 (R_1 + x_{o_1}(x_2)) \right) \frac{\delta x}{\delta x_2} - G_1 \frac{\delta z}{\delta x_2} + F_{тр} \left(\frac{\delta x_1}{\delta x_2} + \frac{\delta z_1}{\delta x_2} \right), \quad (5)$$

$$\ddot{x}_2 m = \left(G_2 (\mu \sin \varphi - \cos \varphi) - 2m\omega \sqrt{\left(\frac{\delta x}{\delta x_2}\right)^2 + \left(\frac{\delta z}{\delta x_2}\right)^2} + m\omega^2 (R_1 + x_{o_1}(x_2)) \right) \frac{\delta x}{\delta x_2} - G_1 \frac{\delta z}{\delta x_2} + F_{тр} \left(\cos \alpha_p \frac{\delta x_1}{\delta x_2} + \sin \alpha_p \frac{\delta z_1}{\delta x_2} \right). \quad (6)$$

Графики зависимостей координат центра масс и силы трения $F_{тр1}$ от обобщенной координаты и результаты численного решения дифференциального уравнения движения на этапе 3 показаны на **рис. 9**.

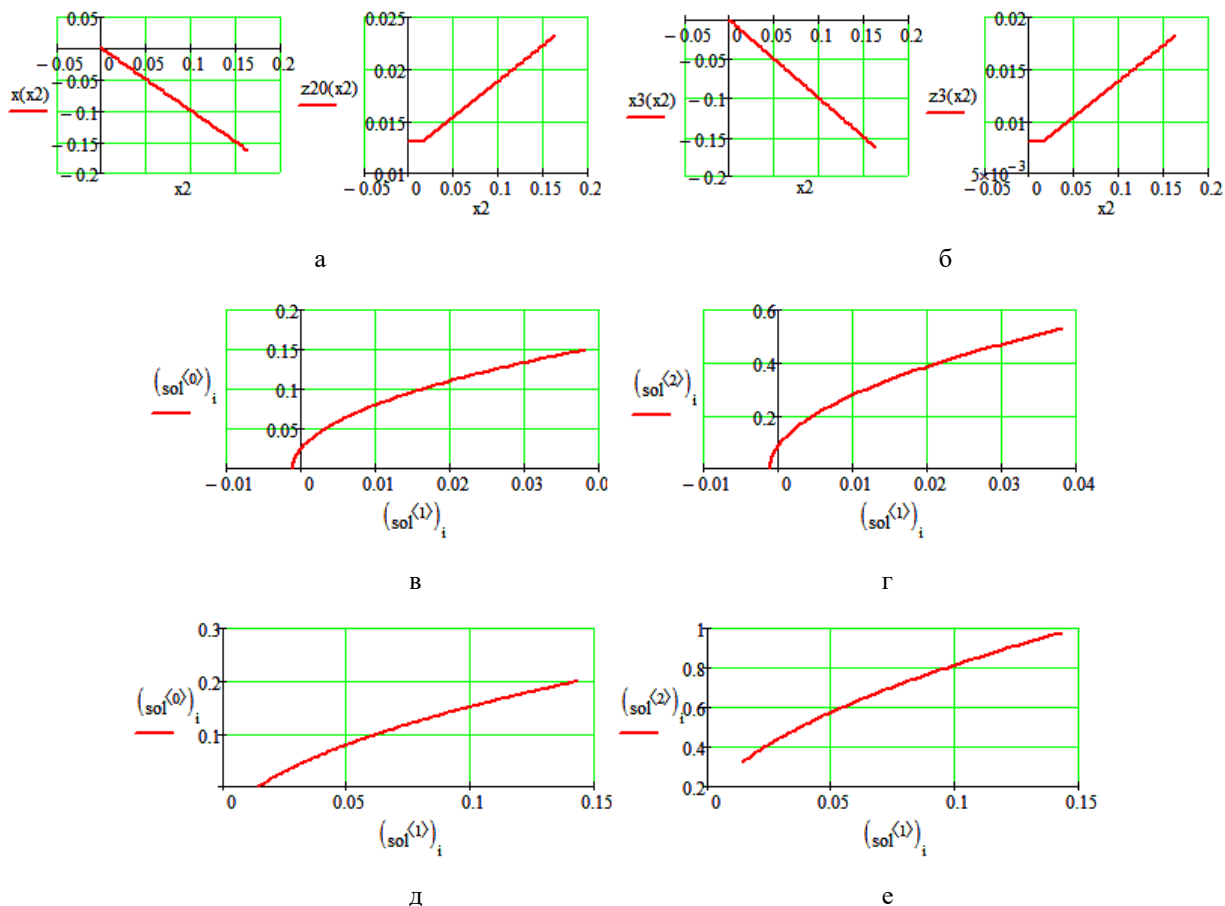


Рис. 9. Графики зависимостей координат центра масс (а) и силы $F_{Тр1}$ (б) от обобщенной координаты этапа 3 и результаты численного решения дифференциального уравнения движения времени (в, д) и угловой скорости (г, е) от обобщенной координаты для первого (в, г) и второго (д, е) подэтапов

Fig. 9. Plots of the coordinates of the center of mass (а) and force $F_{Тр1}$ (б) for the generalized coordinate at stage 3 and the results of the numerical solution of the differential equation of time motion (в, д) and angular velocity (г, е) for the generalized coordinate for the first (в, г) and second (д, е) sub-stages

Математическая модель процесса движения ступенчатой детали на всех этапах ее пассивного ориентирования, представленная дифференциальными уравнениями (2)-(6), позволяет определить общее время пассивного ориентирования: $t_{ор} = t_1 + t_2 + t_3$.

Результаты математического моделирования полного времени пассивного ориентирования ступенчатой детали с параметрами $d_1 = 0,01$ м, $d_2 = 0,007$ м, $l = 0,030$ м, массой $m = 0,016$ кг и коэффициентом трения $\mu = 0,35$ о направляющие поверхности БЗУ приведены на рис. 10.

Пересечения графиков $t_{ор}(\omega)$ и $t_{д}(\omega)$ позволяют для каждой пары значений определить предельное значение угловой скорости диска. Предельным значением угловой скорости вращающегося диска для ступенчатых деталей с указанными параметрами при $\alpha_{д} = 45^\circ$ является $\omega_{пред} \approx 1,16$ рад/с, при $\alpha_{д} = 50^\circ$ – $\omega_{пред} \approx 1,72$ рад/с, при $\alpha = 55^\circ$ – ограничений по ориентированию нет.

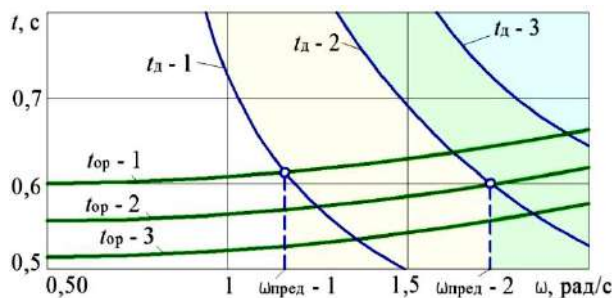


Рис. 10. Графики зависимостей времени пассивного ориентирования и времени прохождения карманом с деталью зоны ориентирования от угловой скорости при $\alpha_{д} = 45^\circ$ ($t_{ор-1}$, $t_{д-1}$), $\alpha_{д} = 50^\circ$ ($t_{ор-2}$, $t_{д-2}$) и $\alpha = 55^\circ$ ($t_{ор-3}$, $t_{д-3}$)

Fig. 10. Plots of passive orientation time and travelling time of the pocket with the part along the orientation zone for angular velocity at $\alpha_{д} = 45^\circ$ ($t_{ор-1}$, $t_{д-1}$), $\alpha_{д} = 50^\circ$ ($t_{ор-2}$, $t_{д-2}$) and $\alpha = 55^\circ$ ($t_{ор-3}$, $t_{д-3}$)

Заключение

Рассмотренная в работе методика и разработанная на ее основе математическая модель движения деталей при их ориентировании в механических дисковых БЗУ позволяют получить значения кинематических параметров БЗУ, при которых оно будет надежно функционировать в зависимости от типа и геометрических параметров детали, а также конструктивных параметров БЗУ. Это позволит обеспечить повышение основных показателей качества сборочного оборудования при загрузке изделий массового выпуска на предприятиях машино- и приборостроительных отраслей промышленности.

Список источников

1. Дьякова Э.В. Способы ориентирования близких к равноразмерным деталей с асимметрией по торцам в механических бункерных загрузочных устройствах // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. №10. С. 105-110.
2. Прейс В.В. Надежность автоматических роторно-конвейерных линий для сборки многоэлементных изделий // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2003. №10. С. 17-22.
3. Автоматизация загрузки прессов штучными заготовками / В.Ф. Прейс [и др.]; под ред. В.Ф. Прейса. М.: Машиностроение, 1975. 280 с.
4. Рожковский В.Д., Прейс В.Ф. Исследование условий поворота полуфабрикатов на ножах, расположенных на наклонном вращающемся диске // Труды Тульского механического института. Тула: Оборонгиз, 1951. №5. С. 64-79.
5. Анчишкина Л.Ф., Рожковский В.Д., Прейс В.Ф. Ориентирование деталей в гравитационном поле // Автоматизация в машиностроении и приборостроении. Киев: Техника, 1968. С. 100-120.
6. Астраханцев А.Г., Прейс В.В. Кинематика процесса ориентирования предмета обработки в гравитационном ориентаторе с L-образным захватом // Известия ТулГУ. Технические науки. 2007. №3. С. 12-18.
7. Пахомов И.Н., Прейс В.В. Математическая модель процесса ориентирования асимметричного по торцам предмета обработки в гравитационном ориентаторе с маятниковым L-образным захватом // Известия ТулГУ. Технические науки. 2012. №12-2. С. 48-59.
8. Пантюхина Е.В., Прейс В.В., Хачатурян А.В. Динамика процесса пассивного ориентирования деталей в механическом зубчатом бункерном загрузочном устройстве // Известия ТулГУ. Технические науки. 2019. №3. С. 394-401.
9. Хачатурян А.В., Прейс В.В. Теоретическая и экспериментальная оценка времени пассивного ориентирования штучных деталей, асимметричных по торцам, в механическом зубчатом бункерном загрузочном устройстве // Известия ТулГУ. Технические науки. 2019. №6. С. 303-312.

10. Pantyukhina E.V., Preis V.V., Pantyukhin O.V. Passive orientation of the parts in the mechanical disk hopper feeding device with an annular orientator and radial grooves // J. Phys.: Conf. Ser. 2021, vol. 1791, 012105.
11. Пантюхина Е.В., Прейс В.В., Пантюхин О.В. Пассивное ориентирование деталей в механическом дисковом бункерном загрузочном устройстве с кольцевым ориентатором и радиальными пазами // Динамика систем, механизмов и машин. 2020. Т. 8. №2. С. 73-83.
12. Пат. 2720017 Российская Федерация, МПК В23Q 7/02. Бункерное загрузочное устройство для цилиндрических заготовок с конической формой одной из концевых частей / В.В. Прейс, Е.В. Пантюхина; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ТулГУ». № 2019119579; заявл. 21.06.2019; опубл. 23.04.2020.

References

1. Dyakova E.V. Methods of orienting parts close to equal-sized ones with asymmetry at the ends in mechanical hopper loading devices. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [News of Tula State University. Technical Sciences]. 2021;(10):105-110. (In Russ.)
2. Preis V.V. Reliability of automatic rotary conveyor lines for assembling multi-element products. *Sbornka v mashinostroenii, priborostroenii* [Assembly in Mechanical Engineering, Instrument Engineering]. 2003;(10):17-22. (In Russ.)
3. Preis V.F. et al. *Avtomatizatsiya zagruzki pressov shtuchnymi zagotovkami* [Automation of press feeding with piece blanks]. Moscow: Mashinostroenie, 1975, 280 p. (In Russ.)
4. Rozhkovsky V.D., Preis V.F. Study on the turning conditions of semi-finished products on knives located on an inclined rotating disk. *Trudy Tulsogo mekhanicheskogo instituta* [Proceedings of Tula Mechanical Institute]. Tula: Oborongiz, 1951;(5):64-79. (In Russ.)
5. Anchishkina L.F., Rozhkovsky V.D., Preis V.F. Orientation of parts in a gravitational field. *Avtomatizatsiya v mashinostroenii i priborostroenii* [Automation in Mechanical and Instrument Engineering]. Kyiv: Tekhnika, 1968:100-120. (In Russ.)
6. Astrakhantsev A.G., Preis V.V. Kinematics of the process of orientation of an item under machining in a gravitational orienting device with an L-shaped grip. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [News of Tula State University. Technical Sciences]. 2007;(3):12-18. (In Russ.)
7. Pakhomov I.N., Preis V.V. A mathematical model of the process of orientation of an item under machining with asymmetry at the ends in a gravitational orienting device with a pendulum L-shaped grip. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [News of Tula State University. Technical Sciences]. 2012;(12-2):48-59. (In Russ.)
8. Pantyukhina E.V., Preis V.V., Khachaturian A.V. Dynamics of the process of passive orientation of

- parts in a mechanical gear hopper feeding device. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [News of Tula State University. Technical Sciences]. 2019;(3):394-401. (In Russ.)
9. Khachaturian A.V., Preis V.V. Theoretical and experimental estimation of passive orientation time of unit parts asymmetric at ends in a mechanical gear hopper feeding device. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [News of Tula State University. Technical Sciences]. 2019;(6):303-312. (In Russ.)
10. Pantyukhina E.V., Preis V.V., Pantyukhin O.V. Passive orientation of the parts in the mechanical disk hopper feeding device with an annular orientator and radial grooves. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021;1791:012105.
11. Pantyukhina E.V., Preis V.V., Pantyukhin O.V. Passive orientation of the parts in the mechanical disk hopper feeding device with a ring orienting device and radial grooves. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin* [Dynamics of systems, mechanisms and machines]. 2020;8(2):73-83. (In Russ.)
12. Preis V.V., Pantyukhina E.V. *Bunkernoe zagruzochnoe ustroystvo dlya tsilindricheskikh zagotovok s konicheskoy formoy odnoy iz kontsevykh chastey* [A hopper feeding device for cylindrical blanks with a conical shape of one of the end parts]. Patent RU, no. 2720017, 2020.

Поступила 10.12.2023; принята к публикации 10.01.2024; опубликована 28.03.2024
Submitted 10/12/2023; revised 10/01/2024; published 28/03/2024

Пантюхина Елена Викторовна – кандидат технических наук, доцент,
Тульский государственный университет, Тула, Россия.
Email: e.v.pant@mail.ru. ORCID 0000-0003-0200-7321

Васин Сергей Александрович – доктор технических наук, профессор,
Тульский государственный университет, Тула, Россия.
Email: vasin_sa53@mail.ru.

Пантюхин Олег Викторович – доктор технических наук, профессор,
Тульский государственный университет, Тула, Россия.
Email: olegpantyukhin@mail.ru.

Elena V. Pantyukhina – PhD (Eng.), Associate Professor,
Tula State University, Tula, Russia.
Email: e.v.pant@mail.ru. ORCID 0000-0003-0200-7321

Sergey A. Vasin – DrSc (Eng.), Professor,
Tula State University, Tula, Russia.
Email: vasin_sa53@mail.ru.

Oleg V. Pantyukhin – DrSc (Eng.), Professor,
Tula State University, Tula, Russia.
Email: olegpantyukhin@mail.ru.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ MODELLING OF METALLURGICAL PROCESSES

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 622.73:004.9
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-1-143-155



КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НОВОГО СПОСОБА УПРАВЛЯЕМОГО ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ ПРИ РАЗМЕРНОМ ДРОБЛЕНИИ ХРУПКИХ СРЕД

Сергеев Ю.С.¹, Платов С.И.², Гузеев В.И.¹, Сергеев С.В.¹, Пузанков М.С.¹

¹ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

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

Аннотация. Статья посвящена реализации процессов селективного разрушения хрупких материалов, в частности горных пород, например, при их обогащении. Показано, что самым важным аспектом при исследовании разрушения хрупкой среды вследствие взаимодействия исполнительных органов дробилок с дробимым материалом является трещинообразование. Показано, что при традиционных способах механического дробления разрушение породы происходит неселективно из-за различия структуры и физико-механических свойств дробимых материалов, а значит, и из-за разнородных сценариев формирования в очаге разрушения геометрии микро- и макротрещин. А поскольку основную массу производителей больше всего интересует вопрос управления качеством фракционного состава готового дробленного продукта, то на первый план у исследователей выходит решение вопросов обеспечения контролируемого раскрытия «дефектов» у различных дробимых пород. Для этого в статье продемонстрирован новый способ размерного измельчения хрупких сред. При этом способе для повышения объемной геометрической однородности получаемой крошки путем одновременного формирования разветвленной сети глубоких и поверхностных трещин в зону разрушения материала вводят комплексное управляемое вибрационное воздействие в виде принудительных амплитудно-модулируемых колебаний рабочего органа молотковой дробилки. Далее на конкретном примере показано, как формируются упомянутые комплексные виброперемещения рабочего органа дробилки и каким образом за счет изменения их параметров можно существенно расширить область трещинообразования в дробимом материале. С использованием компьютерного моделирования на суперкомпьютере «Торнадо ЮУрГУ» в программном комплексе LSTC LS-Dуна наглядно показана эффективность увеличения области трещинообразования при вибродроблении горной породы в сравнении с традиционными способами без применения вибрации. Эффективность нового способа также подтверждена натурными экспериментами, проведенными с использованием экспериментальной дробилки. Такой подход к управлению трещинообразованием позволяет одновременно добиваться квазиоднородности дисперсного продукта.

Ключевые слова: моделирование, трещинообразование, диспергирование, хрупкие материалы, комбинированные виброприводы, управление однородностью

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., Пузанков М.С., 2024

Для цитирования

Компьютерное моделирование нового способа управляемого трещинообразования при размерном дроблении хрупких сред / Сергеев Ю.С., Платов С.И., Гузеев В.И., Сергеев С.В., Пузанков М.С. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №1. С. 143-155. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-143-155>



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

COMPUTER MODELING OF A NEW METHOD OF CONTROLLED CRACKING DURING DIMENSIONAL CRUSHING OF BRITTLE MATERIALS

Sergeev Yu.S.¹, Platov S.I.², Guzeev V.I.¹, Sergeev S.V.¹, Puzankov M.S.¹

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

² Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. The paper is devoted to processes of selective destruction of brittle materials, in particular rocks, for example, during their beneficiation. It has been shown that the most important aspect in the study on crushing of brittle rocks due to the interaction between crusher actuators and the crushed material is cracking. It has been shown that by applying conventional methods of mechanical crushing, the rock destruction is not selective due to the difference of the structure and physical and mechanical properties of crushed materials, and, therefore, heterogeneous scenarios of forming micro- and macro-crack geometry in the fracture center. Since the majority of production companies are mostly interested in quality control of the fractional composition of finished crushed products, the researchers focus on the solution to providing controlled opening of “defects” in various crushed rocks. For this purpose, the paper demonstrates a new method of the size reduction of brittle materials. When using such method, a complex controlled vibration impact is introduced in the zone of material destruction as forced amplitude-modulated vibrations of the working body of the hammer crusher to increase the geometric bulk homogeneity of the resulting crumbs by simultaneous formation of a branched network of deep and surface cracks. Then the specific example shows how the mentioned complex vibration displacements of the crusher working body are formed and how it is possible to significantly expand the area of crack formation in the crushed material as a result of changing the parameters. Using computer modeling in the LSTC LS-Dyna software complex on the Tornado SUSU supercomputer, the researchers clearly show efficiency of increasing the area of cracking during vibration crushing of rocks in comparison with conventional methods without vibration. Efficiency of the new method is also confirmed by full-scale experiments conducted with an experimental crusher. This approach to cracking control will contribute to achieving quasi-homogeneity of the dispersed product at the same time.

Keywords: modeling, cracking, dispersion, brittle materials, combined vibration drives, homogeneity control

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., Puzankov M.S. Computer Modeling of a New Method of Controlled Cracking During Dimensional Crushing of Brittle Materials. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 1, pp. 143-155. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-143-155>

Введение

Процесс обогащения добытой горной породы неразрывно связан с ее разрушением при поэтапном дроблении, а последующее разделение полученного продукта на фракции по крупности осуществляют грохочением либо просеиванием. При этом для дробления горной породы используют следующие измельчители: раскалывающего и разламывающего действия; истирающе-раздавливающего и раздавливающего действия; ударно-истирающего и ударного действия [1]. Причем в таких машинах разрушение материала происходит либо в результате сдавливающего воздействия на породу рабочими элементами машины (щеками, конусами, валками), либо ударного взаимодействия кусков породы с рабочими органами – молотками в молотковых и роторных дробилках. При дроблении в

молотковых дробилках раскалывание отдельных кусков породы доводится до требуемых размеров конечного продукта. Но при таких механических способах воздействия на породу ее разрушение происходит не селективно из-за различия структуры и физико-механических свойств дробимых минералов, а значит, и из-за разнородных сценариев формирования в очаге разрушения геометрии микро- и макротрещин [2].

С целью повышения эффективности современного горно-перерабатывающего производства минерального сырья целесообразнее применять размерное измельчение для получения требуемой фракции конечной товарной минеральной крошки [3]. Но большинство исследователей [2, 3] больше интересуются практической стороной решения задачи управления качеством фракционного состава готового дробленого продукта, глубоко не вникая в суть физико-механических процессов

разрушения твердых хрупких сред. Приближая понимание реальных процессов хрупкого и квазихрупкого разрушения твердых конденсированных сред к его модельному представлению, целый ряд исследователей [4-12] проанализировали и обобщили научный опыт разных отечественных и зарубежных ученых в области разрушения твердых сред. В результате выяснилось, что механика деформируемого твердого тела в рамках традиционных макроскопических представлений, базирующихся на силовых критериях, оказалась не готовой к решению подобных многомасштабных задач. И если в изучении режимов развития отдельных единичных трещин было получено много важных результатов, то решение проблемы разрушения материала макроскопический подход предложить не смог, поскольку предлагаемые критерии перехода материала к разрушению никак не учитывали время приложения нагрузки, что вообще исключает возможность предсказывать сценарий и время наступления разрушения. Впрочем, огромный накопленный экспериментальный материал позволил сформулировать механикам правильные представления об особенностях неупругого деформирования и последующего разрушения хрупких сред.

Однако удовлетворительных математических моделей описания этих стадий и процесса разрушения в целом как многомасштабного явления традиционная механика не смогла предложить. Для решения этих задач и корректной постановки проблемы прогноза разрушения нужны принципиально новые идеи и подходы, базирующиеся на изучении нелинейной динамики сверхбыстрых критических стадий [4] трещинообразования в очагах разрушения сред.

Отсюда сформулированы главные направления этих исследований:

- прочность твердых тел и сред с трещинами;
- геометрия трещин и напряженно-деформированное состояние вблизи трещин;
- динамика трещин.

Отметим, что решение задач о совместном развитии двух или нескольких трещин на основе этих классических подходов встретилось с практически непреодолимыми математическими трудностями и ограничениями усредненного макроскопического подхода. Также было выявлено [4-6, 9, 12], что разные хрупкие материалы имеют различные структуры со своими характерными картинами тензоров напряжений. Поэтому при диспергировании для каждого вида текстуры среды желателен свой конкурирующий механизм разрушения. А поскольку у большинства 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. Следовательно, процесс деформации тела сводится к уве-

личению размеров и количества макро- и микродефектов. Такой подход к размерному диспергированию хрупких сред обоснован повышением объемной геометрической однородности получаемых дисперсных частиц. Это можно достигнуть путем введения в зону разрушения материала комплексного управляемого вибрационного воздействия в виде принудительных комбинированных колебаний рабочего органа, например молотковой дробилки, для одновременного формирования разветвленной сети глубоких и поверхностных трещин [12, 13]. Такой подход к управлению трещинообразованием среды позволит добиваться селективности дисперсных продуктов.

Новый способ измельчения хрупких материалов [13] осуществляется следующим образом (рис. 1): каждому ударному элементу (молотку) рабочего органа задают степень подвижности вокруг собственных осей, а наряду с их совместным вращением со скоростью ω_0 принудительно задают с некоторой амплитудой пульсации скорости вращения величиной $\pm \omega_1$: для перемещения точки удара из ТУ0 в ТУ1 при $\omega_0 - \omega_1$, затем обратно в точку ТУ0 и далее в точку ТУ2 при $\omega_0 + \omega_1$. Такое перемещение осуществляется циклически, поскольку колебания скорости вращения ω_0 осуществляются в течение всего времени работы вентильно-индукторного привода вращения [14]. Одновременно с этим колебательным движением принудительно осуществляют виброперемещения точки удара еще и в вертикальном направлении по синусоиде за счет прецессионного движения с нутацией посредством инерционного роторного вибропривода [15], ротор которого жестко связан с молотком в вертикальном направлении. В результате совместного действия таких виброперемещений точка удара находится всегда на синусоиде, крайние положения которой меняются в соответствии с перемещениями точки удара от ТУ0 до ТУ1 и обратно, а затем от ТУ0 до ТУ2.

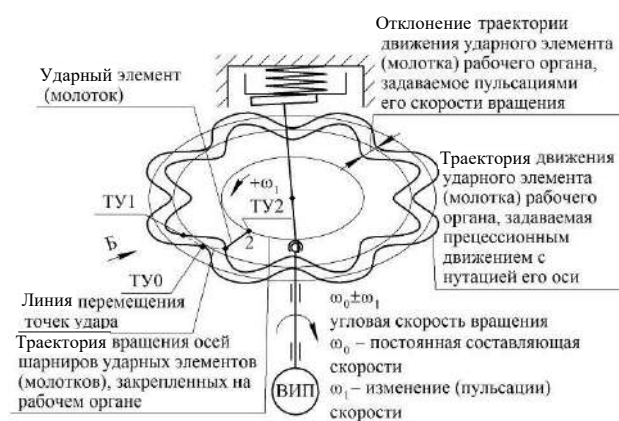


Рис. 1. Схема формирования траектории движения рабочего органа вибрационной молотковой дробилки

Fig. 1. Scheme of forming the trajectory of the working body of the vibrating hammer crusher

При равномерном вращении рабочего органа с молотками, закрепленными шарнирно, с возможностью поворота в горизонтальной плоскости относительно точки закрепления в традиционных молотковых дробилках удар обеспечивают только в одной точке поверхности измельчаемого материала, раскалывая его. По новому же способу, наряду с пульсациями скорости вращения $\omega_0 \pm \omega_1$, принудительно задают каждому молотку вертикальные колебательные перемещения, получая три такие точки (рис. 2): точка удара 1 при среднем положении молотка; точка удара 2 при перемещении молотка вверх; точка удара 3 при перемещении молотка вниз.

По сути, так образуется массив точек, лежащих на линии от точки 2 до точки 3 в вертикальном направлении. В результате такого распределенного удара будет и несколько центров трещинообразования – в точках 1, 2 и 3 соответственно. В горизонтальном направлении виброперемещения положений мгновенных точек приложения силы удара молотка по поверхности измельчаемого тела осуществляются посредством пульсаций скорости вращения оси с частотой $\pm\omega_1$. При горизонтальном перемещении положения точки приложения силы удара (см. рис. 2) в случае $\omega_0 - \omega_1$ получаем точку ТУ1, в которой формируется трещина. Затем при $\omega_1 = 0$ положения точки приложения силы удара перемещаются в точку ТУ0, в которой также формируется трещина, а затем при $\omega_0 + \omega_1$ в точку ТУ2, которая совпадает с точкой ТУ1, обеспечивая дополнительное трещинообразование и разрушение материала.

При этом, как видно из вышеописанного комплекса действий, при изменении параметров колебаний появилась возможность изменять положения точки приложения силы удара (распределять ее по поверхности) и, соответственно, управлять процессом трещинообразования, что приведет к изменению и стабилизации размера откалываемых частиц.

Совместное перемещение положения точки приложения силы удара в вертикальном и горизонтальном направлениях образует область распределения таких точек (см. рис. 2), где обозначены положения точек приложения силы удара при вертикальном перемещении, это точки 1, 2 и 3 соответственно, а положения точек приложения силы удара при горизонтальном перемещении соответственно ТУ0, ТУ1 и ТУ2.

Так формируется расширенная область трещинообразования. Поскольку образуется целый массив точек, обеспечивающих управляемое трещинообразование, процесс измельчения приобретает прогнозируемый характер и, соответственно, происходит стабилизация гранулометрического состава.

В соответствии со способом [13], во время работы дробилки инерционный роторный вибропривод [15] передает виброперемещения рабочему органу, который совершает движение по траектории сложной формы, при этом обеспечивается возможность управлять формой траектории за счет амплитудно-модулируемых колебаний вибропривода. Рассмотрим кинематическую схему (рис. 3), отображающую перемещение молотка 4 (в виде материальной точки 5).

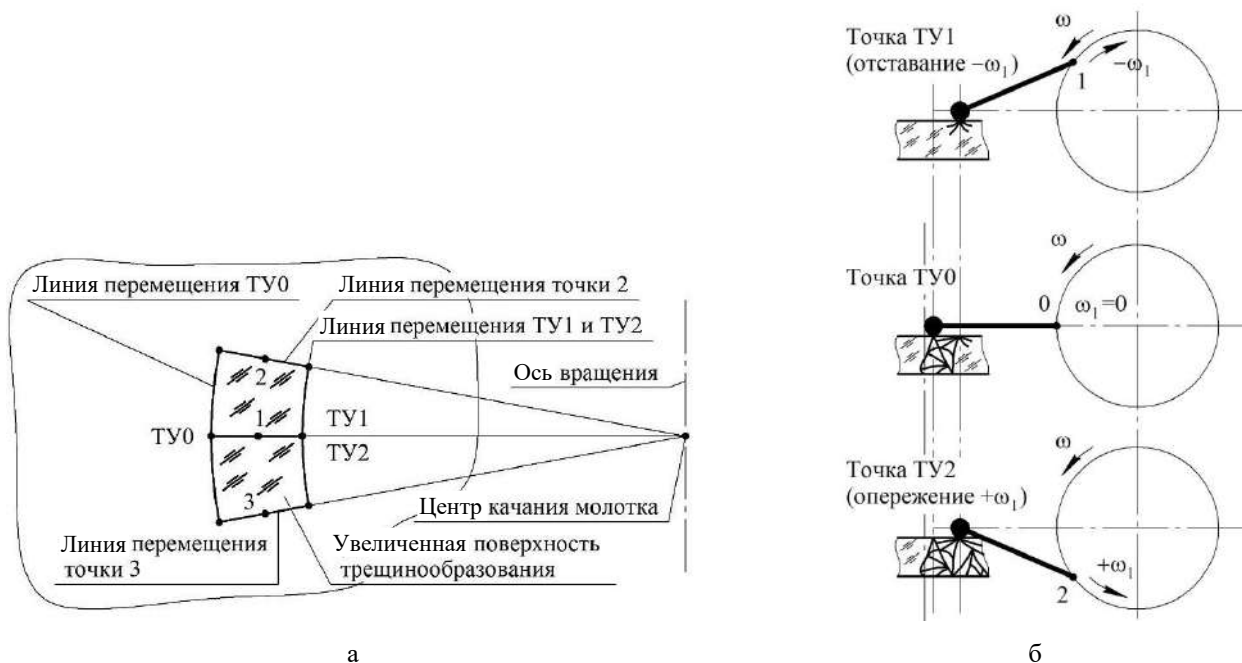


Рис. 2. Формирование увеличенной мгновенной площади поверхности трещинообразования: а – вид сверху; б – фронтальная проекция

Fig. 2. Forming the increased instantaneous area of the cracking surface: a is a top view; б is a frontal projection

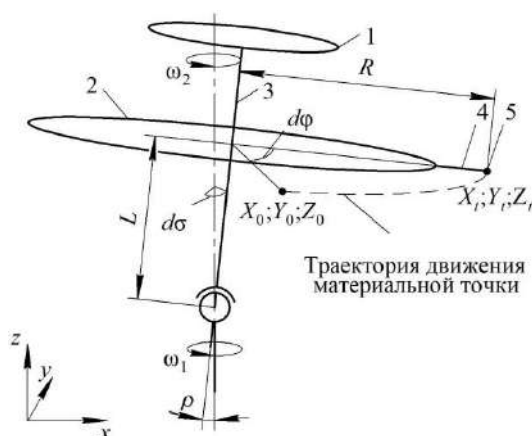


Рис. 3. Кинематическая модель: 1 – вращаемое тело; 2 – диск с расположенными равномерно на периферии дробящими телами – молотками; 3 – ротор; 4 – молоток; 5 – материальная точка

Fig. 3. A kinematic model: 1 is a rotating body; 2 is a disc with the crushing bodies – hammers located uniformly on the periphery; 3 is a rotor; 4 is a hammer; 5 is a point of impact

Для вывода параметрического уравнения траектории движения материальной точки 5 дополнительно введем некоторые необходимые величины:

- j – радиальная жесткость ротора 3;
- ω_1 – угловая скорость вращения ротора 3;
- ω_2 – переносная угловая скорость вращения тела 1;
- ρ – угол отклонения оси ротора 3;

$d\phi$ – текущее изменение угла поворота ротора 3 вокруг собственной оси;

$d\sigma$ – текущее изменение угла поворота ротора 3 вокруг оси прецессии;

R – расстояние от центра масс молотка (материальной точки 5) до оси вращения ротора 3;

L – расстояние от шарнирной заделки ротора до центра окружности вращения материальной точки 5;

X_0, Y_0, Z_0 – координаты материальной точки 5 в начальный момент времени t_0 ;

X_t, Y_t, Z_t – координаты материальной точки 5 в расчетный момент времени t .

Найдем угол поворота материальной точки 5 (молотка) относительно оси ротора ϕ_t в момент времени t :

$$\phi_t = \phi_0 + \omega_1 t, \quad (1)$$

где ϕ_0 – величина угла ϕ_t в начальный момент времени.

Найдем расчетный угол поворота σ_t материальной точки 5 относительно оси прецессии вращающегося ротора 3:

$$\sigma_t = \omega_2 t. \quad (2)$$

Тогда суммарный расчетный угол поворота γ_t молотка от сложения двух вращательных движений будет

$$\gamma_t = \phi_t + \sigma_t, \quad (3)$$

а вспомогательные координаты материальной точки 5 при угле γ_t запишем в виде

$$\begin{cases} x_1(t) = R \sin(90 - \gamma_t) \cos(\rho), \\ y_1(t) = R \cos(90 - \gamma_t), \\ z_1(t) = R \sin(90 - \gamma_t) \sin(\rho). \end{cases} \quad (4)$$

Причем вспомогательные координаты материальной точки 5 при повороте системы координат на угол σ_t при $z_2(t) = z_1(t)$ будет в виде системы уравнений

$$\begin{cases} x_2(t) = x_1(t) \cos \sigma_t + y_1(t) \sin \sigma_t, \\ y_2(t) = -x_1(t) \sin \sigma_t + y_1(t) \cos \sigma_t. \end{cases} \quad (5)$$

Затем определим смещение материальной точки 5 по осям системы координат при отклонении ротора на угол ρ в момент времени t :

$$\begin{cases} \Delta x_t = L \sin(-\rho) \cos \sigma_t, \\ \Delta y_t = L \sin(-\rho) \sin \sigma_t, \\ \Delta z = L \cos(\rho). \end{cases} \quad (6)$$

Тогда координаты материальной точки 5 в момент времени t определим как сумму систем (5) и (6):

$$\begin{cases} X(t) = x_2(t) + \Delta x_t, \\ Y(t) = y_2(t) + \Delta y_t, \\ Z(t) = z_2(t) + \Delta z. \end{cases} \quad (7)$$

Подставим (1)-(6) в систему уравнений (7) и выполним некоторые преобразования, в итоге получим окончательный вид параметрического уравнения траектории движения рабочего органа без учета инерционных эффектов:

$$\begin{cases} X(t) = R \sin(90 - \phi_0 + \omega_1 t + \omega_2 t) \cos(\rho) \cos \omega_2 t + \\ \quad + R \cos(90 - \phi_0 + \omega_1 t + \omega_2 t) \sin \omega_2 t + \\ \quad + L \sin(-\rho) \cos \omega_2 t; \\ Y(t) = -R \sin(90 - \phi_0 + \omega_1 t + \omega_2 t) \cos(\rho) \sin \omega_2 t + \\ \quad + R \cos(90 - \phi_0 + \omega_1 t + \omega_2 t) \cos \omega_2 t + \\ \quad + L \sin(-\rho) \sin \omega_2 t, \\ Z(t) = R \sin(90 - \phi_0 + \omega_1 t + \omega_2 t) \sin(\rho) L \cos(\rho). \end{cases} \quad (8)$$

Из (8) следует, что чтобы определить форму траектории и положение каждого молотка на диске, нужно знать следующие параметры: угловую скорость вращения ротора ω_1 , угловую скорость прецессионного движения ω_2 , угол наклона ротора ρ , конструктивные расстояния R и L , а также задать углы расположения молотков на диске 2 ротора 3. Для проведения компьютерного моделирования и анализа результатов ударного взаимодействия молотков вибродробилки с породой в соответствии со способом [13] в первую очередь

необходимо определить координаты точек ударов молотков на поверхности единичного образца измельчаемого материала, по которому наносятся дробящие удары. Положим, что решаемая задача состоит в измельчении крупнодисперсного фрагмента горной породы за несколько ударов, поскольку максимальная периферийная скорость молотка и соотношение масс этих двух тел не позволяют раздробить его за один удар. Вместе с тем условно примем, что кусок породы лишен всех степеней свободы (рис. 4) и остается неподвижным в процессе дробления. Также положим, что, например, на одном из дисков дробилки по периферии равномерно размещены три молотка с угловым расположением между собой через 40° (рис. 5).

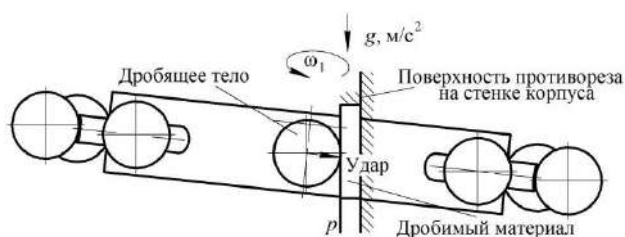


Рис. 4. Схема взаимодействия молотка с куском породы

Fig. 4. Diagram of interaction between the hammer and a piece of rock

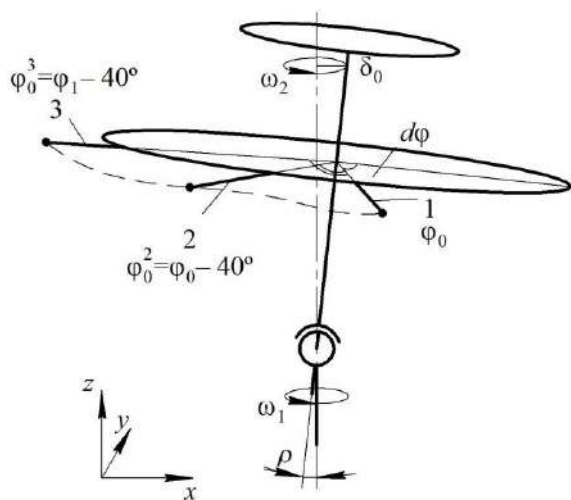


Рис. 5. Схема расположения молотков на одном из дисков вибродробилки

Fig. 5. Schematic arrangement of hammers on one of the vibrating crusher discs

Допустим, что в процессе помола эти молотки оказывают ударное воздействие на тело в момент времени t_y^i , где i – порядковый номер молотка, начиная с 1-го молотка с угловым расположением φ_0 (см. рис. 5). Причем за время $t_y^i - t_0$ первый молоток переместится в точку удара о кусок породы. Поскольку нами принято, что дробимое тело неподвижно, то необходимо определить область поверхности, в которой будут совер-

шаться удары. Затем вычислим координаты каждого молотка при его прохождении через эти координаты после контакта с поверхностью дробимого тела. Координатное расположение этих точек удара для каждого из молотков обозначает область формирования концентраторов напряжений. Величина разброса этих точек, в частности, будет зависеть от того, насколько разнесены между собой молотки по периферии диска.

В зависимости от предварительных размеров кусков измельчаемого материала и площади поверхности соударения, изменением параметров колебаний вентильно-индукторного электропривода достигают максимально большую область поверхности распределения ударов. А это непосредственно оказывает влияние на характер зарождения и распространения трещин в дробимой породе, поскольку каждая новая точка удара будет дополнительно являться концентратором напряжения на хрупком теле. А по мере увеличения области поверхности периодического воздействия комбинированных низко- и высокочастотных колебаний в соответствии с просчитанной матрицей распределения точек удара будет обеспечиваться соответствующий рост трещин и формирование грансостава для конкретных заданных параметров колебаний. Настройку параметров комбинированных колебаний (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2023613203 «Симулятор для моделирования сложнопрофильных вибрационных полей роторно-дебалансных виброприводов с модулирующими свойствами») производят до достижения максимальной эффективности в зависимости от размеров дробимого материала, его физико-механических свойств и требуемого конечного грансостава готового продукта.

Рассмотрим конкретный пример моделирования способа. Отметим, что в соответствии с [15] соотношение частот f вращения ротора ω_1 и его колебаний ω_2 вибропривода молотковой дробилки в зависимости от конструктивного исполнения находится в пределах от 5 до 100 (было подтверждено экспериментально). Поэтому, задав отношение частот при соответствующей угловой скорости ротора, определим угловую скорость прецессионного движения. Условимся, что молоток снабжен ударным элементом в форме шара с радиусом r . Тогда координата точки удара будет смещаться на величину проекции этой величины на соответствующую ось.

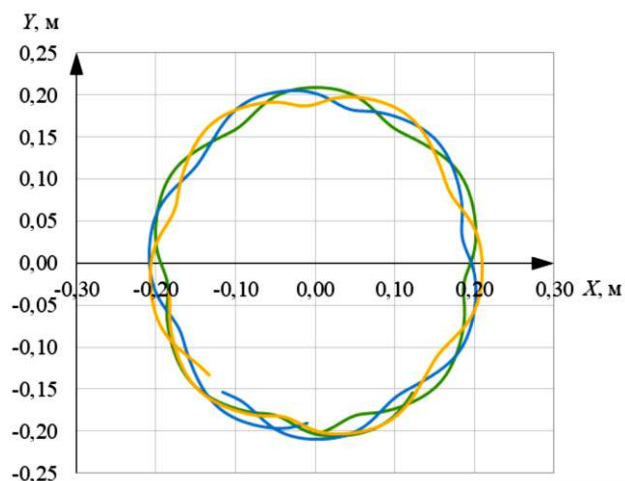
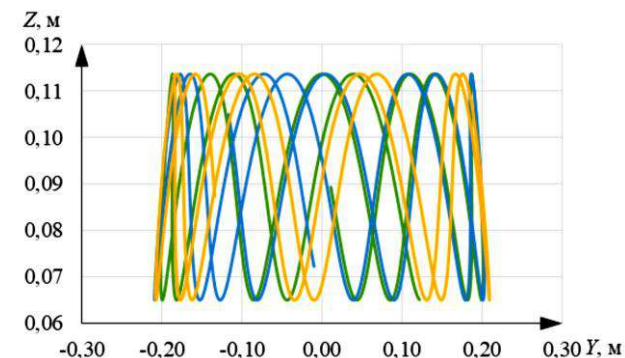
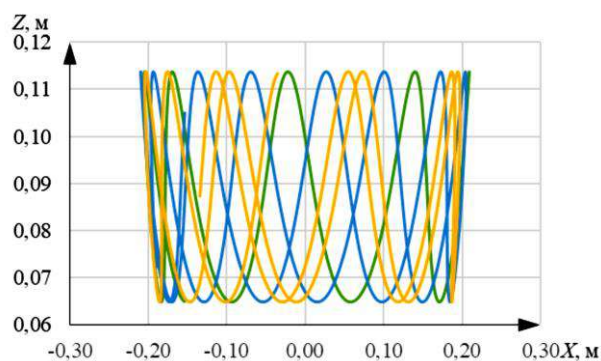
В приближении к реальной экспериментальной установке занесем исходные параметры в табл. 1.

Используя (8) и параметры в табл. 1, построим графики перемещения расчетных материальных точек (удара). Проекции траекторий движений молотков обозначены зеленым, синим и желтым цветами соответственно для каждого молотка с порядковым номером. Рассматриваемый временной интервал 110 мс. Каждая пространственная кривая является одной из форм кривой Лиссажу. Ее проекции представлены на графиках в соответствии с рис. 6-8.

Таблица 1. Исходные параметры для нахождения вибрационных полей исполнительного органа дробилки

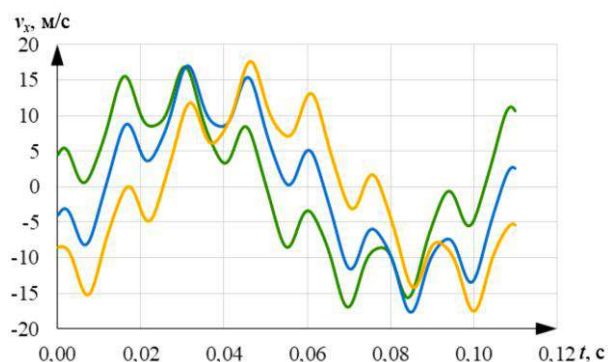
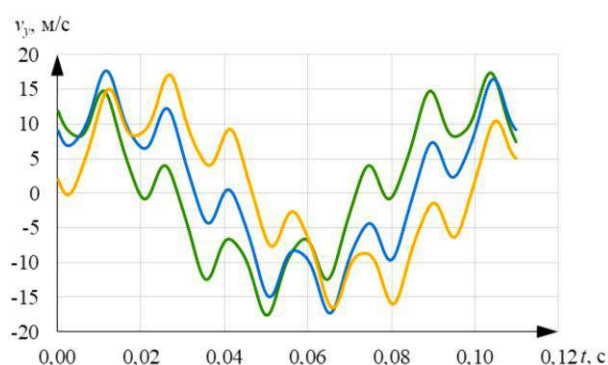
Table 1. Initial parameters for finding the vibration fields of the crusher operating body

Параметр	Величины параметров		
	Молоток 1	Молоток 2	Молоток 3
R , м	0,2	0,2	0,2
L , м	0,09	0,09	0,09
ρ , град	-7	-7	-7
ω_1 , рад/с	62,8	62,8	62,8
f	6,5	6,5	6,5
ω_2 , рад/с	408,2	408,2	408,2
φ_0 , град	-90	-130	-170
r , м	0,025	0,025	0,025

Рис. 6. График проекции траекторий виброперемещений расчетных материальных точек на плоскость XoY Fig. 6. Projected trajectories of vibration displacements of calculated points of impact on the XoY planeРис. 7. График проекции траекторий виброперемещений расчетных материальных точек на плоскость YoZ Fig. 7. Projected trajectories of vibration displacements of calculated points of impact on the YoZ planeРис. 8. График проекции траекторий виброперемещений расчетных материальных точек на плоскость XoZ Fig. 8. Projected trajectories of vibration displacements of calculated points of impact on the XoZ plane

Используя графики скоростей на **рис. 9-11**, определим результирующую скорость виброперемещений расчетных материальных точек (удара) (**рис. 12**):

$$v_i(t) = \sqrt{v_{ix}(t)^2 + v_{iy}(t)^2 + v_{iz}(t)^2}.$$

Рис. 9. График скоростей виброперемещений расчетных материальных точек по оси X Fig. 9. Velocities of vibration displacement of calculated points of impact along the X axisРис. 10. График скоростей виброперемещений расчетных материальных точек по оси Y Fig. 10. Velocities of vibration displacement of calculated points of impact along the Y axis

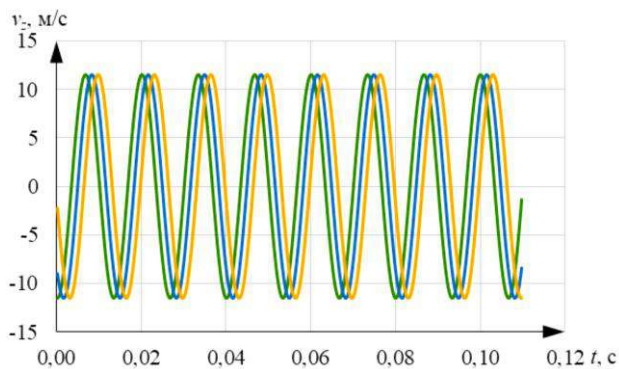


Рис. 11. График скоростей виброперемещений расчетных материальных точек по оси Z
Fig. 11. Velocities of vibration displacement of calculated points of impact along the Z axis

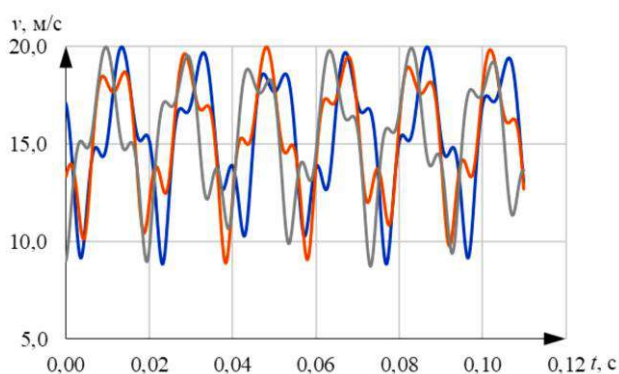


Рис. 12. График результирующих скоростей виброперемещений расчетных материальных точек
Fig. 12. Resulting velocities of vibration displacements of calculated points of impact

На графиках нетрудно заметить, что каждая материальная точка на молотке перемещается по траектории, которая имеет сдвиг по фазе относительно траектории такой же точки на предшествующем молотке на угол между ними в 40°.

В направлении Z модуль скорости будет меньше минимального модуля скорости по осям X и Y – в данном случае 19,9 м/с. Поверхность удара на дробимом теле в соответствии со схемой закрепления (см. рис. 4) будет параллельна плоскости YoZ с абсциссой, равной

$$p = x_{\varphi 0}^1 + r \cos \rho = 10,97 + 25 \cos(-7) = 35,78 \text{ мм},$$

где $x_{\varphi 0}^1$ – абсцисса первой материальной точки, определяющая положение плоскости удара.

За счет шарнирного соединения молотков посредством осей (условно не показаны) на периферии диска после соударения первый молоток с куском дробимого материала по инерции переместится и даст возможность совершить удар по куску дробимо-

го материала следующему молотку. Далее, зная координаты всех точек соударения, определим временные параметры t_y всех соударений (табл. 2).

Пульсации угловой скорости вращения ω_1 можно представить в виде

$$\omega_t = \omega_1 \pm A_{\omega},$$

где A_{ω} – амплитуда колебаний угловой скорости.

Зададим для примера колебания угловой скорости ω_1 по линейному закону с частотой 2 Гц, а амплитуду колебаний примерно равной 10% от номинальной угловой скорости, получим матрицу точек, приведенную в табл. 3.

Таблица 2. Координаты материальных точек (удара) на плоскости дробимого материала (для сценария дробления без пульсаций ω_1)
Table 2. Coordinates of points of impact on the plane of the crushed material (for the scenario of crushing without pulsations ω_1)

Номер молотка i	Время t_y , мс	Координата точки удара, мм		
		X_y	Y_y	Z_y
1	0,0	10,97	-200,00	89,33
2	11,9		-209,15	113,23
3	24,0		-202,53	100,77

Таблица 3. Координаты материальных точек (удара) на плоскости дробимого материала (для сценария дробления с пульсациями ω_1)
Table 3. Coordinates of points of impact on the plane of the crushed material (for the scenario of crushing with pulsations ω_1)

Номер молотка i	Время t_y , мс	Координата точки удара, мм		
		X_t	Y_t	Z_t
1	0,0	10,97	-200,00	89,33
2	11,8		-207,62	99,91
3	24,1		-204,08	105,10

Как видно из табл. 3, такие пульсации несущественно влияют на координаты точек удара в момент времени t_y^i . Координаты точек удара в случае отсутствия колебаний и пульсаций скорости (традиционный способ) будут одинаковы для трех молотков.

Построим диаграмму координат точек удара в плоскости YoZ (рис. 13).

Моделирование разрушения горной породы, сопровождающееся распространением трещин в измельчаемом материале при взаимодействии его с рабочим органом молотковой дробилки, на сегодня возможно только с использованием численных методов. Однако для решения данной нелинейной задачи требуется специальное программное обеспечение, способное реализовать конечно-элементный анализ в явной динамической постановке процесса разрушения [16].

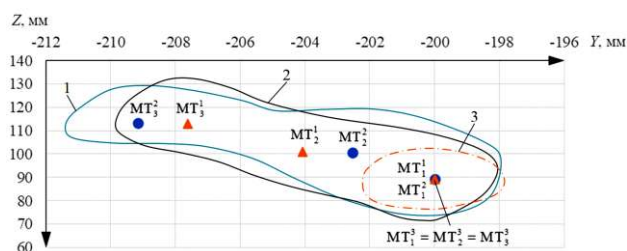


Рис. 13. Точечная диаграмма координат моментов удара на плоскость YoZ : верхний индекс: 1 – колебания, 2 – радиально-осевые колебания и пульсации скорости вращения, 3 – без колебаний и пульсаций; нижний индекс – порядковый номер молотка

Fig. 13. A point chart of coordinates of moments of impact on plane YoZ : upper index: 1 is vibrations, 2 is radial-axial vibrations and pulsations of rotation speed, 3 is without vibrations and pulsations; lower index is a serial number of the hammer

Моделирование процесса измельчения выполнялось на суперкомпьютере «Торнадо ЮУрГУ» в программном комплексе LSTC LS-Dуна. Для численного моделирования процесса дробления был выбран метод конечных элементов по Лагранжу, который позволяет с достаточной точностью показать прогрессирующее раскрытие «дефектов» в материале в виде трещин как на поверхности, так и внутри материала путем удаления дискретных элементов из расчета по достижении критерия разрушения. Так как хрупкому разрушению предшествует зарождение трещины, для которого необходима пластическая деформация, то и критерий разрушения был выбран именно по достижении критического значения пластической деформации. Создание конечно-элементных моделей молотка и фрагмента хрупкой породы выполнено в трехмерной среде LS-PrePost v.4.9.7 (рис. 14). Модель дробимого тела представляет собой параллелепипед с размерами $70 \times 70 \times 15$ мм, модель молотка – сферическая твердая оболочка с радиусом $r = 25$ мм. Размер дискретного элемента конечно-элементной сетки равен 0,75 мм.



Рис. 14. Трехмерная модель для реализации процесса измельчения: 1, 2, 3 – порядковые номера молотков

Fig. 14. A three-dimensional model for the crushing process: 1, 2, 3 are serial numbers of hammers

Параметры хрупкой среды, используемые в модели, заимствованы из исследования [16] и показаны в табл. 4.

Таблица 4. Физико-механические параметры дробимой хрупкой среды
Table 4. Physical and mechanical parameters of crushed brittle materials

Плотность материала ρ_0	$2,7 \cdot 10^{-6}$ кг/мм ³
Модуль сдвига G	21,1 ГПа
Эталонная скорость деформации $EPSI$	$2,59 \cdot 10^{-11}$ с ⁻¹
Предельная прочность T	0,054 ГПа
Параметр прочности при разрушении M	0,88
Параметр прочности неповрежденной породы N	0,82
Объемный модуль упругости $K1$	45,8 ГПа

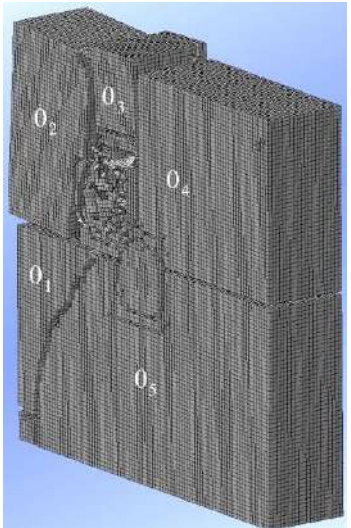
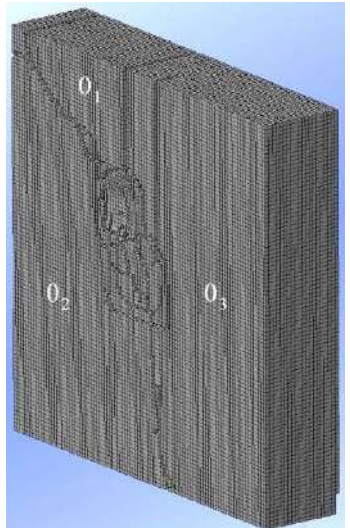
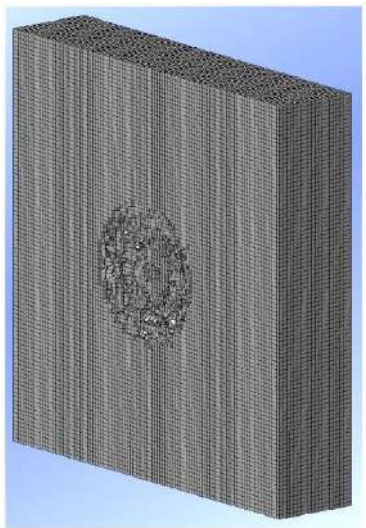
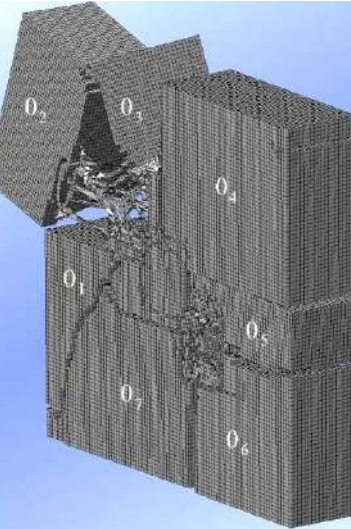
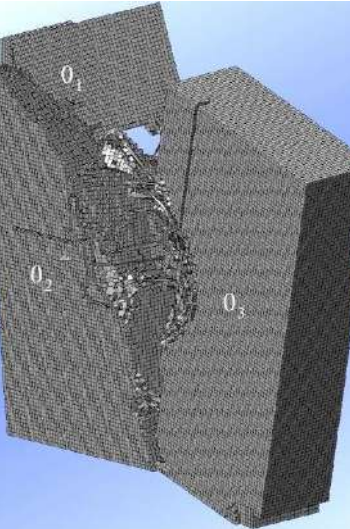
В соответствии с (8) и найденными координатами точек в массиве удара провели серию компьютерных экспериментов ударного воздействия молотков на объект измельчения тремя разными способами: с пульсациями угловой скорости вращения ротора и без них, а также в случае, когда отсутствуют виброперемещения рабочего органа, то есть без каких-либо колебаний. Результаты представлены в табл. 5.

Результаты проведенной серии компьютерных экспериментов показали, что распределение многократных ударов по площади измельчаемого материала существенно ускоряет процесс дробления горной породы и, как следствие, снижает время на формирование конечного гранулометрического состава. Увеличение количества пульсаций скорости влечет к изменению формы траектории движения молотков, что, в свою очередь, увеличивает массив точек ударов. Стоит отметить, что смена координат точек удара меняет также и ориентировку роста трещин, так как каждый последующий удар усиливает рост трещин в своем секторе удара. Каждый удар создает собственный очаг трещин, а в совокупности множество ударов будет образовывать сеть трещин в объеме измельчаемого тела с узлами в этих очагах, от которых появляются вторичные трещины. Вблизи такого узла густота трещин будет максимальна. В свою очередь, это означает, что для этого требуется управлять положением узлов – концентраторов трещин, а значит, необходимо управлять траекториями движений каждого из молотков, осуществляющих удар. При этом, соответственно, будут изменяться и параметры конечного продукта дробления. Так, например, во втором случае при сравнении с первым смещение точек ударов в результате увеличения количества пульсаций скорости вращения ротора привело к существенному изменению грансостава по завершении процесса дробления. Количество осколков в первом случае составляет 7 шт., что на 4 больше, чем во втором – без радиально-осевых колебаний рабочего органа. Однако стоит отметить, что при другом соотношении параметров радиально-осевых колебаний и пульсаций скорости вращения молотков результат может быть и хуже.

Отсюда следует, что существуют такие оптимальные режимы комплексных колебаний рабочего органа, при которых будет достигаться требуемая однородность получаемой крошки. Дальнейшее, более глубокое изучение взаимосвязи между параметрами комплексных колебаний рабочего органа, трещинообразованием и конечным продуктом позволит существенно изменить практическую технологию селективного дробления и повысить культуру производства.

Способ был реализован в конструкции дробилки для измельчения минералов, которая испытана в лабораторных условиях. Задачей испытаний было сравнение производительности и определение степени измельчения различных горных пород посредством устройства при наличии только вращательного движения молотков и при сообщении им дополнительно пульсаций скорости вращения и прецессионного движения с нутацией оси вращения.

Таблица 5. Иллюстрации поэтапного формирования трещин (молотки условно не показаны)
Table 5. Figures of step-by-step crack formation (hammers are not shown for clarity)

С прецессионным движением молотков	С прецессионным движением и пульсациями скорости вращения молотков	Традиционный способ
Момент удара второго молотка		Момент удара третьего молотка
		
Момент удара третьего молотка		<p>Примечание: ударное воздействие трех молотков в одну точку не повлекло зарождения магистральных трещин в силу недостаточно развитой сетки трещин в объеме материала</p>
		

Для создания такого движения дробилка (рис. 15) оборудована планетарным инерционным вибровозбудителем [15], который обеспечивает плавное изменение параметров колебаний, а для обеспечения пульсации скорости применен вентильно-индукторный электропривод [14].

Пульсациями скорости $\omega_0 \pm \omega_1$ управляют за счет электронной системы управления в соответствии с требуемым законом. Регулирование параметров пульсаций частоты вращения осуществляется изменением угла включения и выключения соответствующей обмотки электродвигателя и применяется позиционная коммутация с использованием ШИМ-регулирования, что позволяет не только задавать требуемые законы пульсаций, но и полностью отключать их.

Радиально-осевые колебания (прецессия) рабочего органа, как и пульсации скорости, могут отключаться. По параметрам дробящего усилия, производительности и степени измельчения определялась эффективность применения вышеизложенного способа (рис. 16).

Заключение

Выполненное компьютерное моделирование с использованием численных методов показало повышенную эффективность нового способа дробления хрупких сред, где за счет применения комплексной принудительной вибрации рабочего органа обеспечивается расширенная область трещинообразования в измельчаемой хрупкой среде. Разработанная методика позволяет учитывать топологию структуры и физико-механические свойства дробимой породы.

Более глубокое понимание физической сущности процесса разрушения хрупкой среды и наглядность методики помогут при проектировании дробилок, функционирующих по новому способу, а компьютерное моделирование позволит реально оценить эффективность дробления и сравнить его с традиционными способами.

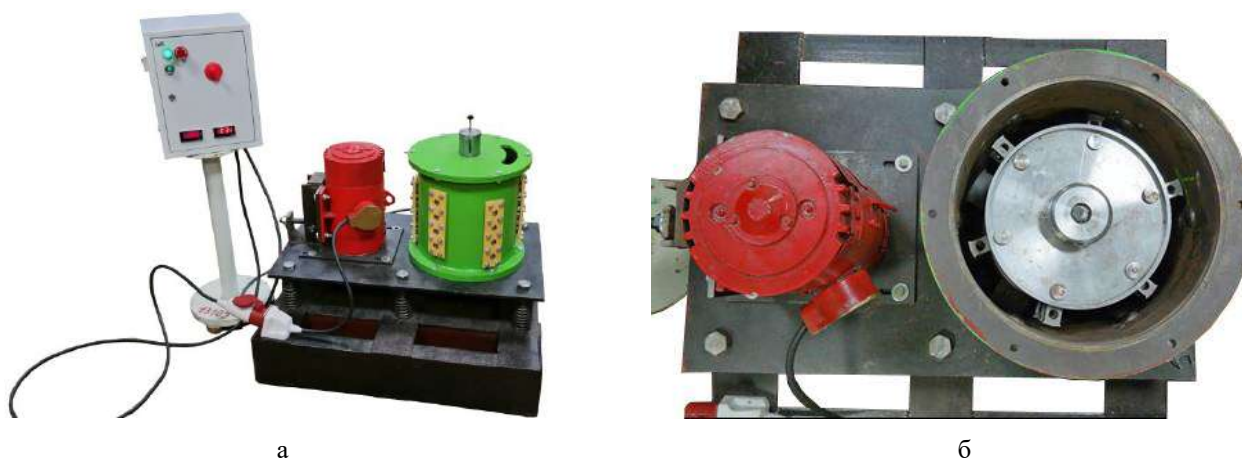


Рис. 15. Экспериментальная молотковая дробилка для управляемого размерного диспергирования хрупких сред: а – общий вид; б – вид сверху на рабочий орган

Fig. 15. An experimental hammer crusher for controlled dimensional dispersion of brittle materials: a is a general view; б is a top view of the working body



Рис. 16. Примеры образцов дробленных минералов, полученных селективным дроблением:

а – офиокальцит; б – мрамор; в – лемезит

Fig. 16. Examples of samples of crushed minerals obtained by selective crushing: a is ophiocalcite; б is marble; в is lemezite

Список источников

1. Горлов И.В., Митусов П.Е., Беляев А.М. Анализ процесса измельчения слабых горных пород // Уголь. 2022. №6. С. 44-47. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-6-44-47
2. Оценка селективности измельчения минеральных комплексов / Г.Д. Краснов, Е.В. Копорулина, А.Н. Краснов, В.В. Чихладзе // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013. №2. С. 86-97.
3. Басыров И.И., Бардовский А.Д. Инновационный способ дробления и конструкция вертикальной валковой дробилки для дробления горной массы // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. №2. С. 121-129. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-121-129
4. Макаров П.В., Еремин М.О. Модель разрушения хрупких и квазихрупких материалов и геосред // Физическая мезомеханика. 2013. Т.16. №1. С. 5-26. DOI: 10.24411/1683-805X-2013-00032
5. Стефанов Ю. П. Некоторые особенности численного моделирования поведения упруго-хрупкопластичных материалов // Физическая мезомеханика. 2005. Т. 8. №3. С. 129-142.
6. Симонов П.С. Экспериментальное исследование дробления горной породы единичным ударом // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. №1. С. 71-79. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-0-71-79
7. Альтшуль Г.М., Гуськов А.М., Пановко Г.Я. Моделирование взаимодействия обрабатываемой породы с вибрационной щековой дробилкой // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2021. №1. С. 33. DOI: 10.31857/S0235711921010053
8. Бартоломей М.Л., Труфанов Н.А. О применение пакета Ansys для исследования деформирования здания с учетом трещинообразования // Вестник Пермского государственного технического университета. 2009. №1. С. 15-20.
9. Бураго Н.Г. Моделирование разрушения упругопластических тел // Вычислительная механика сплошных сред. 2008. Т. 4. №4. С. 5-20.
10. 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
11. 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
12. Improving geometric homogeneity of particles crushed using vibrational drive with modulating properties in machine for crushing brittle materials / S.V. Sergeev, Yu.S. Sergeev, A.A. Dyakonov, E.N. Gordeev // Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems, 2018, 10(13), pp. 2411-2422.
13. Пат. 2732619 Российская Федерация, МПК7 В 02 С 13/00. Способ измельчения хрупких материалов / Ю.С. Сергеев, С.В. Сергеев, Е.Н. Гордеев, А.В. Кононистов, Г.Е. Карпов; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)». №2019113183; заявл. 26.04.2019; опубл. 21.09.2020, Бюл. №27. 11 с.
14. Sergeev Yu.S., Sandalov V.M., Karpov G.E. Modeling of switched reluctance electric vibration drive with adaptive control // 2018 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2018. Sochi, 2018. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501749
15. 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.
16. Shah Q.H., Hamdani A. The damage of unconfined granite edge due to the impact of varying stiffness projectiles // International Journal of Impact Engineering. 2013, vol. 59, pp. 11-17. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2013.03.004

References

1. Gorlov I.V., Mitusov P.E., Belyaev A.M. Analysis of the soft rock crushing process. *Ugol [Coal]*. 2022;(6):44-47. (In Russ.) DOI: 10.18796/0041-5790-2022-6-44-47
2. Krasnov G.D., Koporulina E.V., Krasnov A.N., Chikhladze V.V. Assessment of selectivity of mineral complex crushing. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten [Mining Informational and Analytical Bulletin]*. 2013;(2):86-97. (In Russ.)
3. Basyrov I.I., Bardovskiy A.D. An innovative crushing method and design of the vertical roll crusher for crushing rock masses. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten [Mining Informational and Analytical Bulletin]*. 2020;(2):121-129. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-121-129
4. Makarov P.V., Eremin M.O. A model of fracture of brittle and quasi-brittle materials and geological environment. *Fizicheskaya mezomekhanika [Physical Mesomechanics]*. 2013;16(1):5-26. (In Russ.) DOI: 10.24411/1683-805X-2013-00032
5. Stefanov Yu.P. Some features of numerical modeling of elastic-brittle-plastic materials behavior. *Fizicheskaya mezomekhanika [Physical Mesomechanics]*. 2005;8(3):129-142. (In Russ.)
6. Simonov P.S. Experimental study on rock crushing by a single impact. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten [Mining Informational and Analytical Bulletin]*. 2020;(1):71-79. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-0-71-79
7. Altshul G.M., Guskov A.M., Panovko G.Ya. Modeling of interaction between processed rocks and a vibrating jaw crusher. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin [Problems of Mechanical Engineering and Reliability of Machines]*. 2021;(1):33. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0235711921010053

8. Bartolomey M.L., Trufanov N.A. Applying the Ansys package for studying a building deformation factoring into cracking. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Perm State Technical University]. 2009;(1):15-20. (In Russ.)
9. Burago N.G. Modeling of elastoplastic body fracture. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred* [Computational Mechanics of Continuous Media]. 2008;4(4):5-20. (In Russ.)
10. Pershin G.D., Ulyakov M.S., Pshenichnaya E.G., Gabbasov B.M. An energy method for calculating the productivity of diamond wire saws in the extraction of facing stones. *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
11. 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
12. Sergeev S.V., Sergeev Yu.S., Dyakonov A.A., Gordeev E.N. Improving geometric homogeneity of particles crushed using vibrational drive with modulating properties in machine for crushing brittle materials. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*. 2018;10(13):2411-2422
13. Sergeev Yu.S., Sergeev S.V., Gordeev E.N., Kononistov A.V., Karpov G.E. *Sposob izmelcheniya khrupkikh materialov* [Method of crushing brittle materials]. Patent RU, no. 2732619, 2020.
14. Sergeev Yu.S., Sandalov V.M., Karpov G.E. Modeling of switched reluctance electric vibration drive with adaptive control. 2018 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2018. Sochi, 2018. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501749
15. Sergeev Yu.S., Sergeev S.V. et al. *Sposob возбуждения колебаний* [Method of vibration excitation]. Patent RU, no. 2533743, 2014.
16. Shah Q.H., Hamdani A. The damage of unconfined granite edge due to the impact of varying stiffness projectiles. *International Journal of Impact Engineering*. 2013;59:11-17. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2013.03.004

Поступила 08.11.2023; принята к публикации 19.12.2023; опубликована 28.03.2024
Submitted 08/11/2023; revised 19/12/2023; published 28/03/2024

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 технологий 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, станков и инструментов, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. Email: sergeevsv@susu.ru. ORCID 0000-0001-7868-4295

Пузанков Максим Сергеевич – магистрант, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: mr.maks.134@gmail.com. ORCID 0009-0002-1886-0976

Yury S. Sergeev – PhD (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Electrical Equipment and Automation of Production Processes, 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 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 Technology, Machines and Tools, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: sergeevsv@susu.ru. ORCID 0000-0001-7868-4295

Maksim S. Puzankov – master's student, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: mr.maks.134@gmail.com. ORCID 0009-0002-1886-0976



ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ САМОЗАКЛИНИВАЮЩИХСЯ СТРУКТУР ИЗ КУБИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Константинов Д.В., Пивоварова К.Г., Песин А.М.

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

Аннотация. Представляемая работа является продолжением ранее опубликованных исследований базовых закономерностей поведения самозаклинивающихся структур в различных условиях нагружения. На основе конечно-элементного компьютерного моделирования был проведен анализ напряженного состояния ряда самозаклинивающихся структур из кубических элементов. В программном комплексе конечно-элементного анализа SIMULIA Abaqus был проведен анализ способности самозаклинивающихся структур, состоящих из нескольких слоев, рассеивать точечную и объемную внешнюю нагрузку. Полученные результаты моделирования продемонстрировали широкий теоретический потенциал, ключевые ограничения применимости и основные паттерны распределения напряжений при использовании двух- и десятислойных конструкций из самозаклинивающихся структур. Продемонстрировано, что подобного рода конструкции отлично подходят для рассеивания распределенной по поверхности нагрузки, однако должны быть оценены с позиции рационального количества используемых слоев и элементов, так как при нагрузках определенной величины (и в ряде точек их прикладывания) отдельные слои не будут вовлечены в работу, но приведут к росту общего веса или усложнению конструкции. Также на основе результатов моделирования установлено, что при варьировании размеров элементов в отдельных слоях отдельное внимание должно быть уделено стабильности подобных конструкций, так как в ряде условий нагружения конструкция полностью разрушалась. В частности, в работе исследован случай двухслойной структуры с двукратной разницей в линейных размерах кубических элементов, в котором при нагружении со стороны более мелких элементов происходило неравномерное распределение напряжений и, как следствие, полное разрушение. Приведены первичные предварительные результаты применения сэндвич-панели, изготовленной с применением самозаклинивающейся структуры, позволяющей снизить локализованные значения контактных напряжений за счет увеличения площади контактного пятна вследствие внутреннего перераспределения напряжений. Анализ следов контактного давления на панели и на деформируемой с ее помощью заготовке показал, что на деформируемую заготовку попадает практически в два раза меньшее давление, но само пятно контакта больше и равномернее.

Ключевые слова: многослойные самозаклинивающиеся структуры, конечно-элементное моделирование, перераспределение нагрузки, комплексное нагружение, сэндвич-панели

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №22-19-20073, <https://rscf.ru/project/22-19-20073/>, и финансовой поддержки Челябинской области.

© Константинов Д.В., Пивоварова К.Г., Песин А.М., 2024

Для цитирования

Константинов Д.В., Пивоварова К.Г., Песин А.М. Исследование напряженного состояния многослойных самозаклинивающихся структур из кубических элементов на основе конечно-элементного моделирования // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №1. С. 156-165. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-156-165>



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

FEM STUDY ON THE STRESS STATE OF MULTILAYER SELF-INTERLOCKING STRUCTURES MADE OF CUBIC ELEMENTS

Konstantinov D.V., Pivovarova K.G., Pesin A.M.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. The presented research paper is a continuation of previously published studies on the basic patterns of behavior of self-interlocking structures under various loading conditions. Finite element computer modeling was used to analyze the stress state of a few of self-interlocking structures made of cubic elements. The SIMULIA Abaqus finite element analysis software package was applied to analyze the ability of self-interlocking structures consisting of several layers to dissipate point and volumetric external loads. The obtained simulation results demonstrated a broad theoretical potential, key applicability limitations, and main stress distribution patterns, when using two- and ten-layer self-interlocking structures. It has been demonstrated that structures of this kind are excellent for dissipating a load distributed over the surface, but they are to be assessed from the perspective of a rational number of layers and elements used, since under loads of a certain value (and at a number of points of their application) individual layers will not be involved in the work, but will lead to an increase in total weight or complication of the design. Based on the modeling results, it was also established that when varying the sizes of elements in individual layers, special attention should be paid to the stability of such structures, since under a number of loading conditions the structure was completely damaged. In particular, the study investigated the case of a two-layer structure with a two-fold difference in the linear dimensions of cubic elements, when load of smaller elements resulted in an uneven distribution of stresses and, as a consequence, complete destruction. The paper presents initial preliminary results of using a sandwich panel manufactured using a self-interlocking structure, which makes it possible to reduce localized values of contact stresses by increasing the area of the contact spot due to internal stress redistribution. The analysis of traces of contact pressure on the panel and on the workpiece deformed with its help showed that pressure applied to the workpiece being deformed was almost half as much, but the contact spot itself was larger and more uniform.

Keywords: multilayer self-interlocking structures, finite element modeling, load redistribution, complex loading, sandwich panels

The study was funded by the Russian Science Foundation, grant No.22-19-20073, <https://rscf.ru/project/22-19-20073/>, and the Chelyabinsk Region.

For citation

Konstantinov D.V., Pivovarova K.G., Pesin A.M. Fem Study on the Stress State of Multilayer Self-Interlocking Structures Made of Cubic Elements. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 1, pp. 156-165. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-156-165>

Введение

Рассеивание и контролируемое перераспределение импульсных нагрузок является одной из типовых задач при проектировании инженерных конструкций и строительных сооружений. Особенно остро эта проблема стоит в области проектирования объектов, которые эксплуатируются в сложно прогнозируемых или экстремальных условиях. Поэтому помимо эффективности применения становятся важными простота, гибкость и универсальность применяемых инженерных решений. Альтернативой в данном случае могут стать так называемые самозаклинивающиеся структуры, анализ которых до последнего времени ограничивался математическими задачами разного уровня. Известно, что в пространстве размерностью три и выше имеет место феномен самозаклинивающих структур.

Самозаклинивающаяся структура – это так спози-

ционированный набор выпуклых тел с неперекрывающимися внутренностями, что если зафиксировать все кроме любого одного, оставшееся нельзя «унести на бесконечность».

История открытия самозаклинивающих структур, а также их примеры и приложения подробно представлены в работах [1-3]. Данная тема получила известность как в области исключительно теоретической математики, так и в приложениях как к архитектуре, так и к естественным наукам [4]. Ей посвящен ряд статей [1-3, 5-7] как в популярных [4], так и в высокорейтинговых журналах, включая “Nature” [8]. На данный момент подобная идея уже используется при создании бронежилетов и баллистических заграждений.

В разное время возникали различные группы исследователей, например Thomas Siegmund’s group, MYMECH, Francois Barthelat, Yves Brechet, Andrey

Molotnikov, Giuseppe Fallacara и др. [9-13]. Имеющиеся структуры базируются на рассмотрении слоев из кубов, тетраэдров и октаэдров, а также их вариациях. Данные структуры обладают особенностью: при фиксации границы по периметру структура становится жесткой и не проваливается.

Помимо квазиплоских структур, имеются структуры, в которых заклинивание происходит в нескольких слоях одновременно. Это вопросы, относящиеся к облицовке плоского слоя с фиксированным периметром. Следует отметить, что большинство исследований с самозаклинивающимися структурами было выполнено математиками. По данной тематике практически отсутствуют публикации в области металлургии, машиностроении, строительстве. Начиная с 2019 года, в Магнитогорском государственном техническом университете им. Г.И. Носова на базе лаборатории механики градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева была создана группа ученых, металлургов, специалистов в обработке металлов давлением, математиков, строителей для комплексного исследования возможности применения самозаклинивающихся структур в различных областях техники. За это время совместно с учеными из Австралии (Дискин А., Пастернак Е.) и МФТИ (Белов А.Я.) было подано семь заявок на изобретения РФ, на одну из которых получен патент на изобретение и еще на одну – решение о выдаче патента на изобретение.

Представляемые исследования являются продолжением ранее проведенной работы по компьютерному моделированию напряженного состояния самозаклинивающихся структур, состоящих из кубических элементов [14]. В продолжение ранее упомянутых исследований проводилось конечно-элементное моделирование нагружения многослойных самозаклинивающихся структур.

Моделирование и результаты

Модель двухслойной самозаклинивающейся структуры, состоящей из кубических элементов, представлена на **рис. 1**.

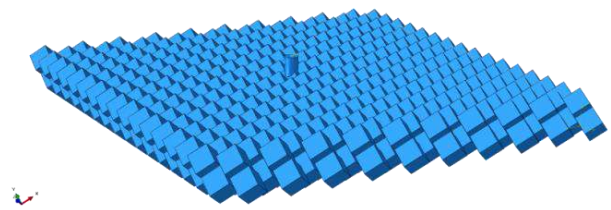


Рис. 1. Общий вид двухслойной самозаклинивающейся структуры с центральным точечным нагружением

Fig. 1. General view of the two-layer self-interlocking structure with central point loading

Результаты моделирования показали, что при точечном нагружении в центральную часть одного из слоев подобные структуры изменяют характер нагружения относительно случая с однослойной конструкцией. На **рис. 2** представлены поля результирующих перемещений в верхнем (слева) и нижнем (справа) слоях конструкции.

Как показали результаты моделирования, прикладываемая нагрузка в данном случае имеет разный характер распределения в каждом из слоев. Дело в том, что при подобной компоновке слоев каждый кубический элемент нагружаемого верхнего слоя начинает распределять прилагаемую нагрузку не только между соседствующими шестью элементами своего слоя, но и оказывает давление на три примыкающих элемента из нижеследующего слоя. Таким образом, многослойная конструкция из представленного примера может перераспределять вглубь себя даже точно приложенную в один элемент нагрузку.

Для первичной оценки потенциала увеличения количества слоев в подобного рода конструкциях была разработана десятислойная модель, каждый слой которой состоял из 320 одинаковых кубических элементов (**рис. 3**) и которая исследовалась при точечном нагружении в верхний слой (по аналогии с ранее упомянутой моделью), нагружении в девять равномерно распределенных по площади слоя точек и во всех случаях, но с нагружением с двух сторон конструкции.

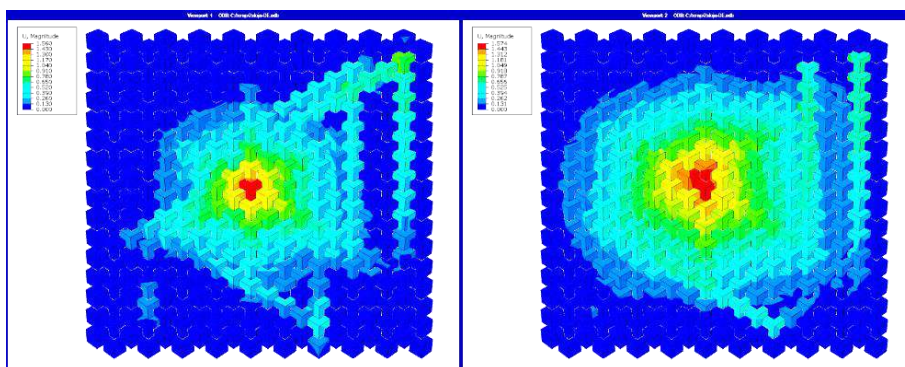


Рис. 2. Распределение результирующих смещений в двухслойной самозаклинивающейся структуре с центральным точечным нагружением

Fig. 2. Distribution of the resulting displacements in the two-layer self-interlocking structure with central point loading

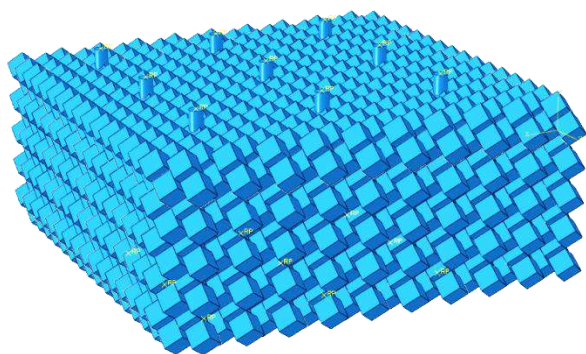


Рис. 3. Общий вид десятислойной самозаклинивающейся структуры
Fig. 3. General view of the ten-layer self-interlocking structure

Анализ распределений напряжений Мизеса и результирующих смещений при центральном точечном нагружении верхнего слоя (рис. 4, 5) показал, что прикладываемая нагрузка плавно рассеивается в каждом из задействованных слоев конструкции с постепенным полным угасанием к нижнему слою. При этом результирующие смещения показывают, что центральные слои конструкции работают менее эффективно, чем слои периферийные. Это может быть объяснено тем, что кубические элементы центральных слоев ограничены в своём перемещении примерно одинаковым количеством слоев сверху и снизу, вследствие чего потенциал распределения нагрузки в них становится также лимитирован. Однако именно в центральных слоях рассматриваемой конструкции паттерн распределения напряжений максимально симметричен и напоминает ранее опубликованные результаты для однослойной самозаклинивающейся структуры.

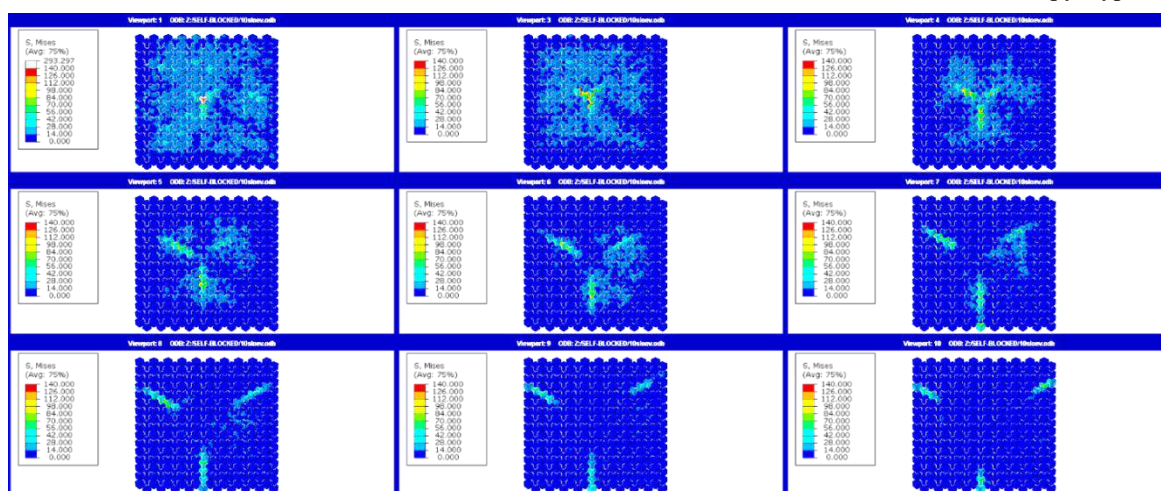


Рис. 4. Распределение напряжений Мизеса в каждом слое десятислойной самозаклинивающейся структуры при центральном точечном нагружении верхнего слоя
Fig. 4. Von Mises stress distribution in every layer of the ten-layer self-interlocking structure under central point loading of the upper layer

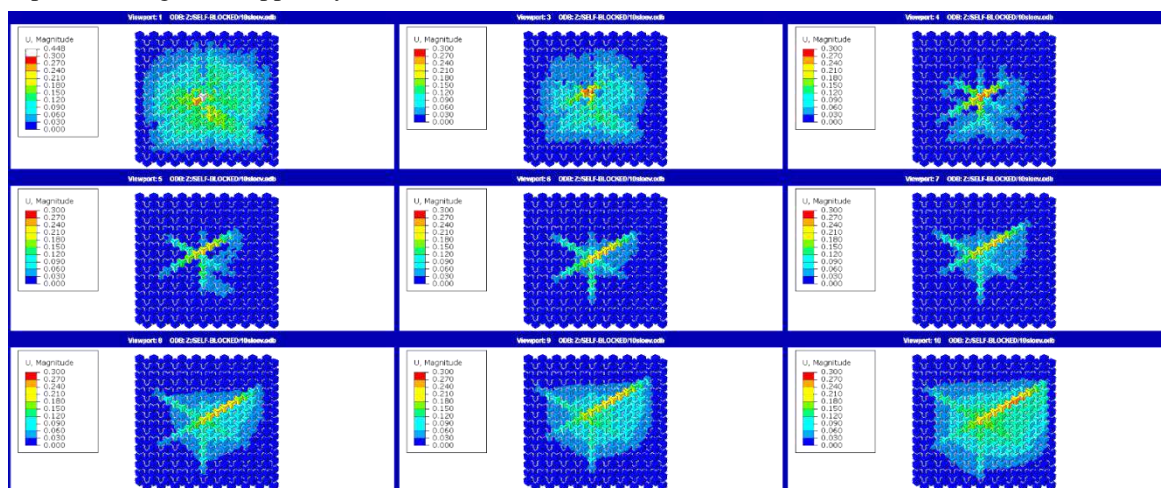


Рис. 5. Распределение результирующих смещений в каждом слое десятислойной самозаклинивающейся структуры при центральном точечном нагружении верхнего слоя
Fig. 5. Distribution of the resulting displacements in every layer of a ten-layer self-interlocking structure under central point loading of the upper layer

Примечательно, что при более интенсивном 9-точечном нагружении верхнего слоя (рис. 6, 7) подобная тенденция по распределению нагрузки сохраняется, но становится ярче выраженной. Так, например, Y-подобный паттерн распределения нагрузки формируется в десятислойной конструкции уже с третьего слоя.

При прикладывании распределенной 9-точечной нагрузки на поверхность верхнего слоя (рис. 8, 9) исследуемая десятислойная конструкция из самозаклинивающихся структур максимально эффективно рассеивает нагрузку в своем объеме, минимально вовлекая в работу нижние периферийные слои. Из этого

может следовать вывод, что подобного рода конструкции отлично подходят для рассеивания распределенной по поверхности нагрузки, однако должны быть оценены с позиции рационального количества используемых слоев, так как при нагрузках определенной величины отдельные слои не будут вовлечены в работу, но приведут к росту общего веса или усложнению конструкции. Следовательно, в данном аспекте появляется теоретическая возможность применения либо более легких, либо более дешевых материалов, из которых изготовлены кубические элементы самозаклинивающейся структуры.

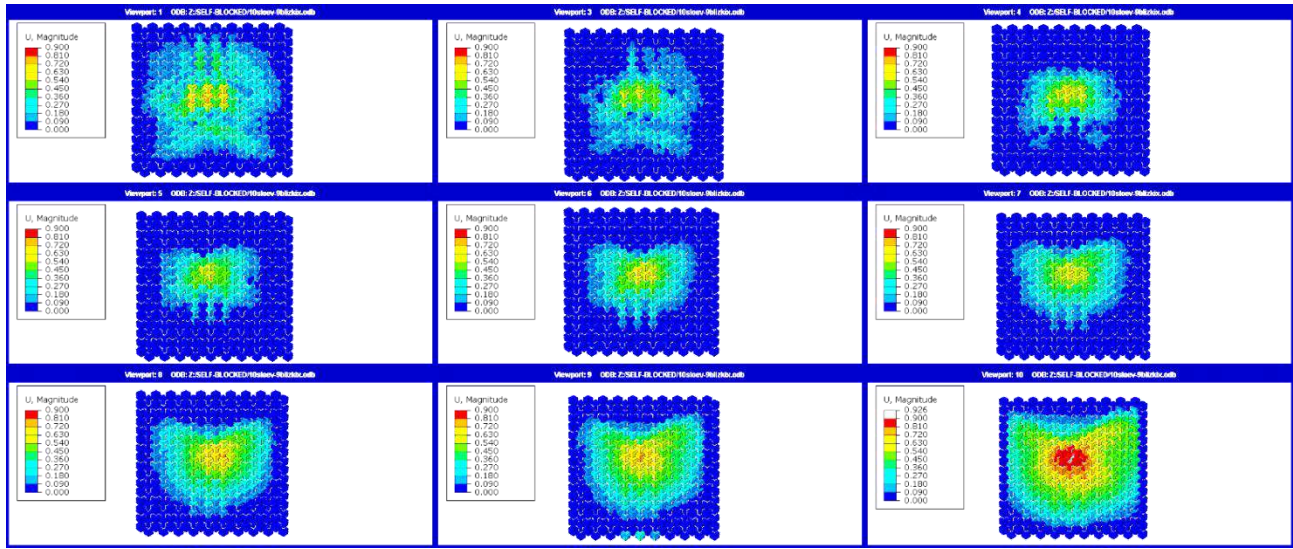


Рис. 6. Распределение результирующих смещений в каждом слое десятислойной самозаклинивающейся структуры при центральном 9-точечном нагружении верхнего слоя

Fig. 6. Distribution of the resulting displacements in every layer of a ten-layer self-interlocking structure under central 9-point loading of the upper layer

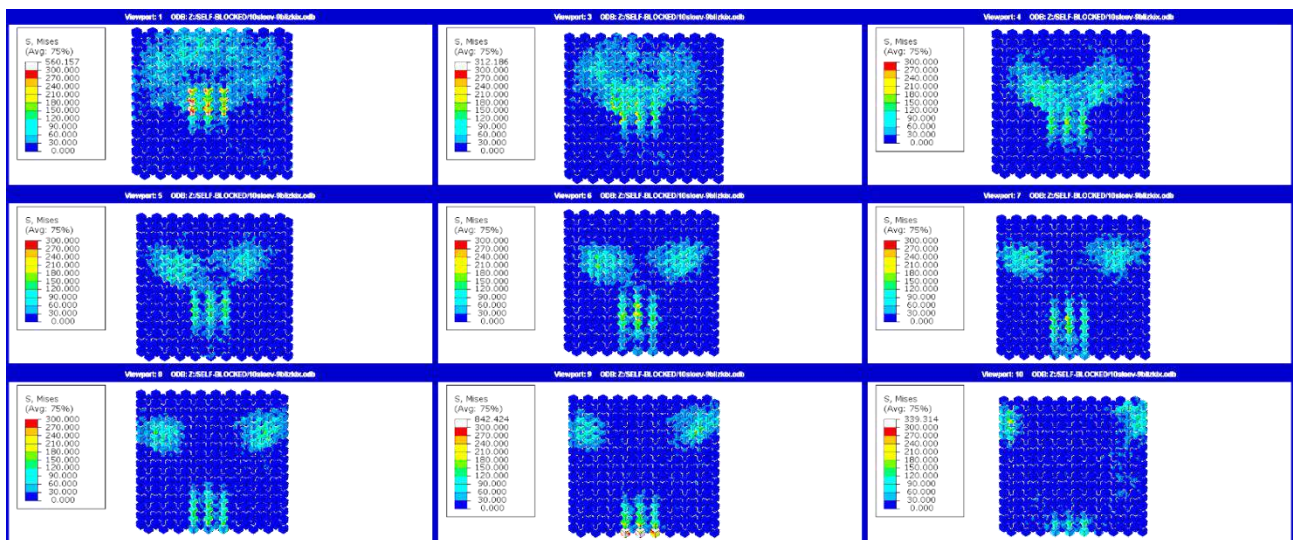


Рис. 7. Распределение напряжений Мизеса в каждом слое десятислойной самозаклинивающейся структуры при центральном 9-точечном нагружении верхнего слоя

Fig. 7. Von Mises stress distribution in every layer of a ten-layer self-interlocking structure under central 9-point loading of the upper layer

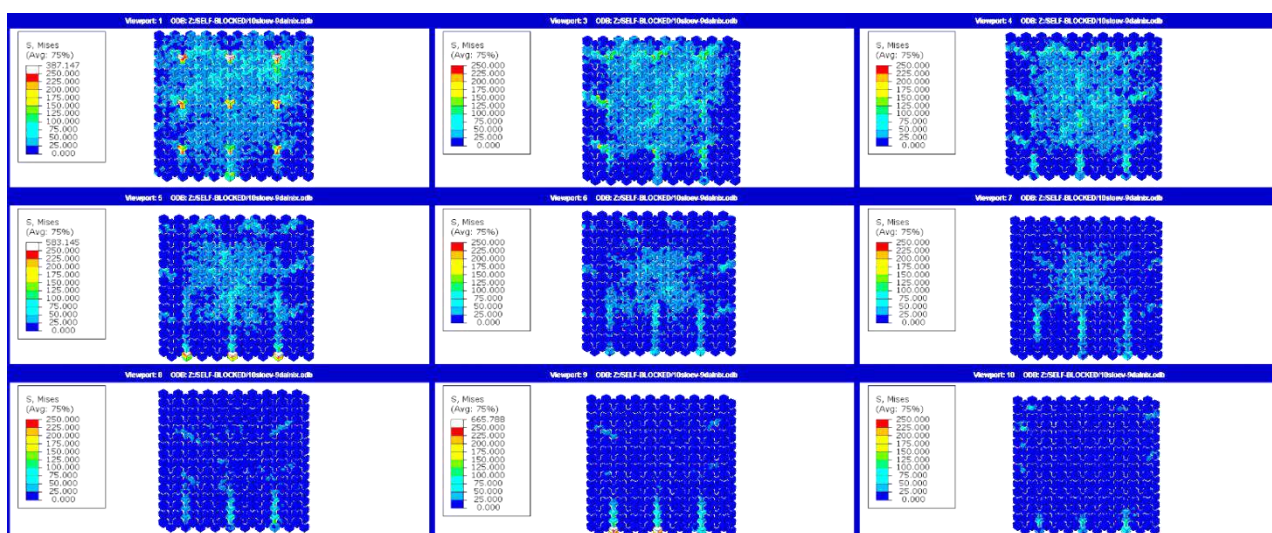


Рис. 8. Распределение напряжений Мизеса в каждом слое десятислойной самозаклинивающейся структуры при распределенном 9-точечном нагружении верхнего слоя

Fig. 8. Von Mises stress distribution in every layer of a ten-layer self-interlocking structure under distributed 9-point loading of the upper layer

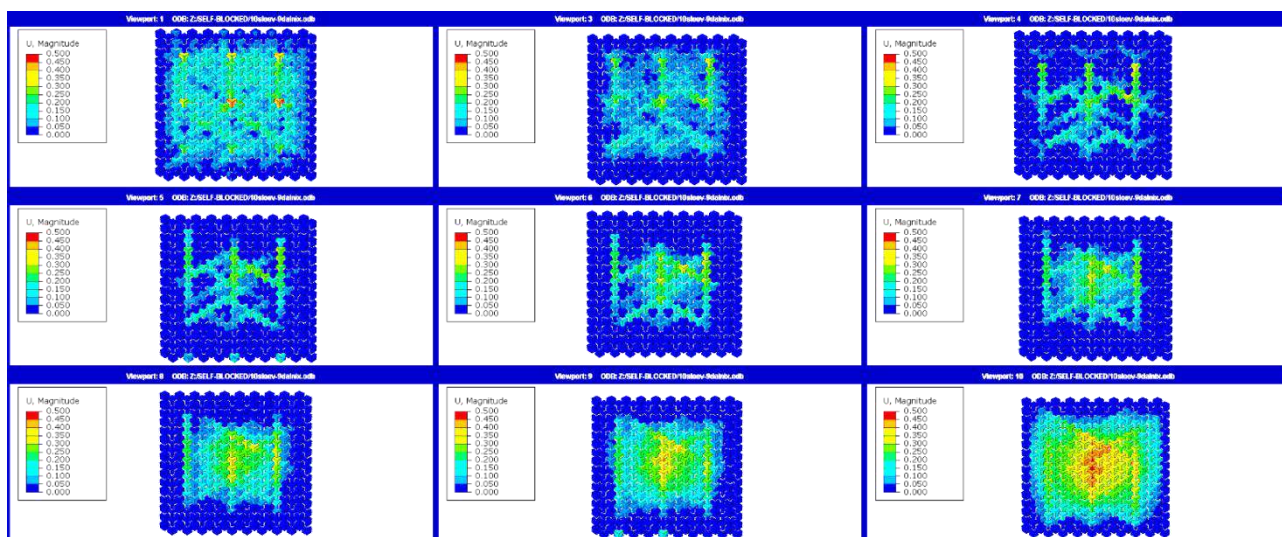


Рис. 9. Распределение результирующих смещений в каждом слое десятислойной самозаклинивающейся структуры при равномерном 9-точечном нагружении верхнего слоя

Fig. 9. Distribution of the resulting displacements in every layer of a ten-layer self-interlocking structure under uniform 9-point loading of the upper layer

При исследовании аналогичного случая 9-точечного распределенного нагружения, но с двух сторон, наблюдалось, что напряженное состояние структуры становится максимально уравновешенным, так как распределяемые с нижних слоев напряжения начинают компенсировать аналогичную нагрузку с другой стороны (рис. 10).

Также дополнительно была смоделирована двухслойная самозаклинивающаяся структура, один из слоев которой имел кубические элементы размером в два раза меньше, чем у элементов первого слоя (рис. 11).

Моделирование показало, что, несмотря на очень

равномерное перераспределение точно приложенной нагрузки, устойчивость подобных конструкций требует дополнительного и более глубокого изучения, так как серьезно зависит от того, к какому слою эта нагрузка прикладывается.

Далее была смоделирована осадка алюминиевого параллелепипеда через сэндвич-панель, состоящую из усеченных кубических элементов (рис. 12).

Анализ следов контактного давления на панели и на заготовке показал, что на деформируемую заготовку попадает практически в два раза меньшее давление, однако само пятно контакта больше и равномернее (рис. 13).

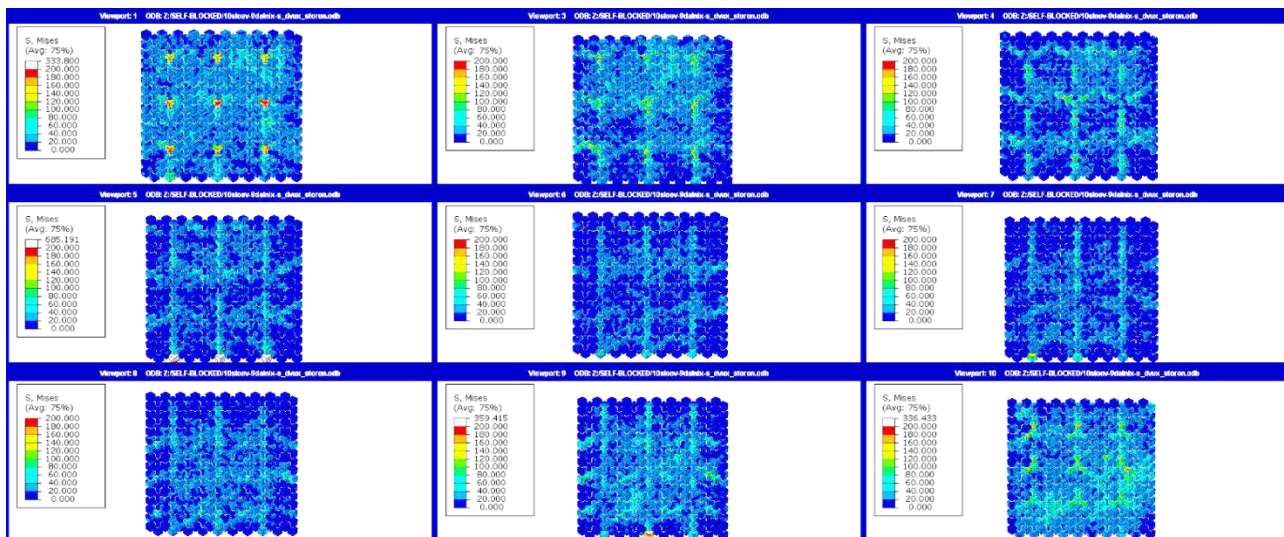


Рис. 10. Распределение напряжений Мизеса в каждом слое десятислойной самозаклинивающейся структуры при распределенном 9-точечном нагружении одновременно верхнего и нижнего слоев
 Fig. 10. Von Mises stress distribution in every layer of a ten-layer self-interlocking structure under distributed 9-point loading of the upper and lower layers at the same time

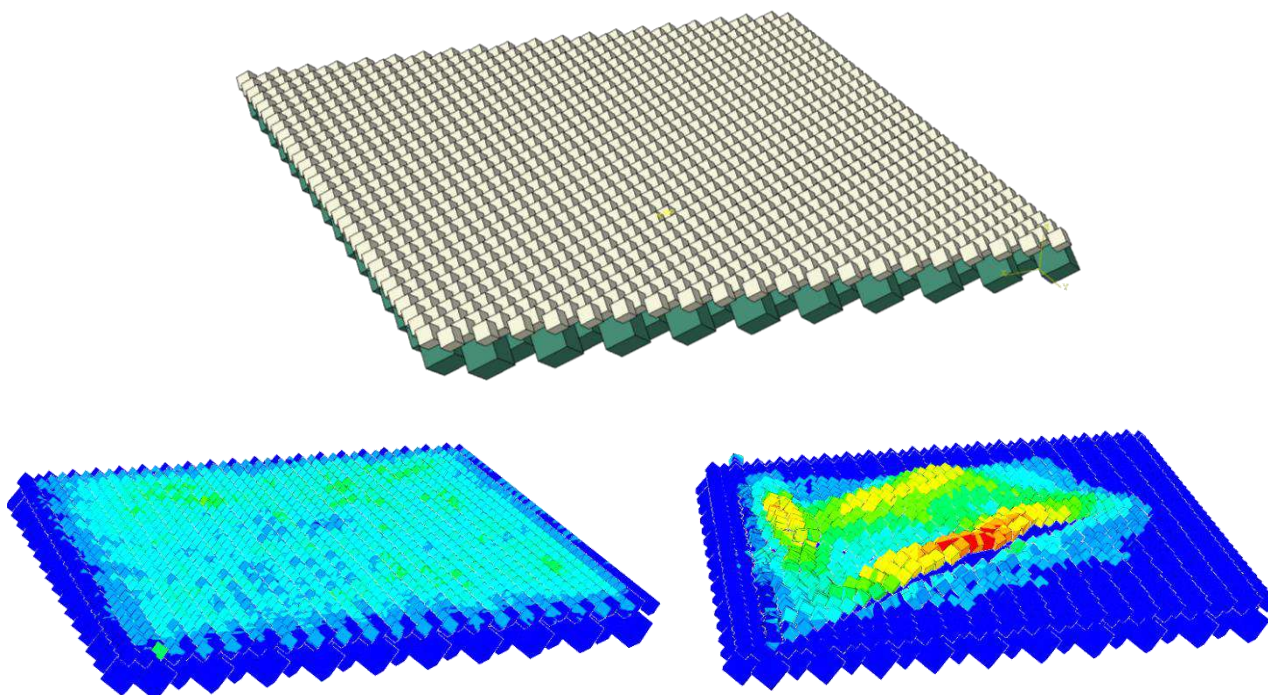


Рис. 11. Результаты моделирования двухслойной самозаклинивающейся структуры
 Fig. 11. Modeling results of a two-layer self-interlocking structure

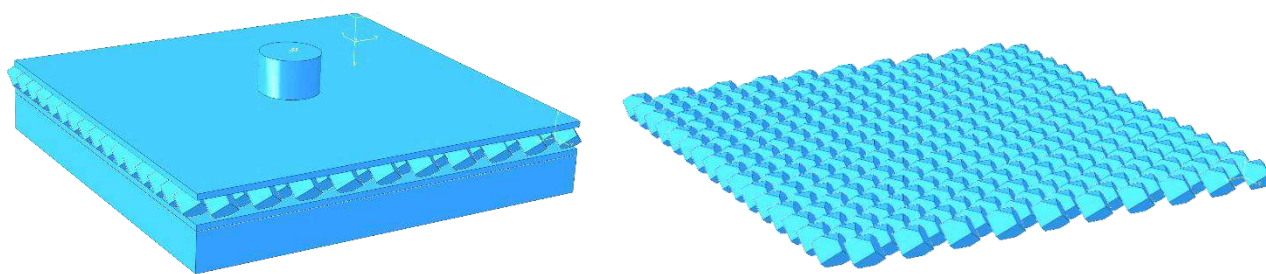


Рис. 12. Общий вид модели осадки посредством сэндвич-панели
Fig. 12. General view of the upsetting model using the sandwich panel

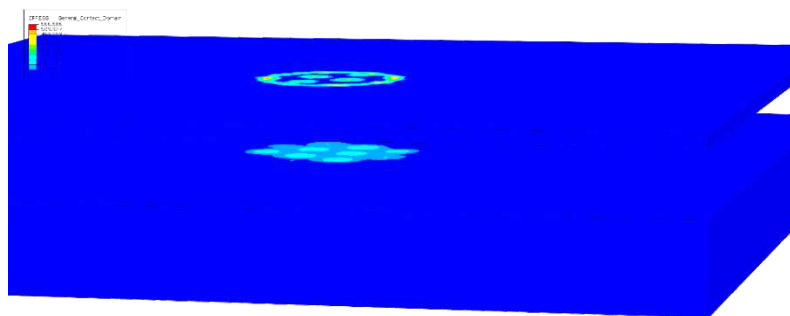


Рис. 13. Распределение контактных напряжений на осаживаемой через сэндвич-панель заготовке
Fig. 13. Distribution of contact stresses on the upset workpiece using the sandwich panel

Заключение

Полученные результаты наглядно демонстрируют богатый потенциал практического применения самозаклинивающихся структур с позиции их использования для гашения различного рода нагрузок в строительной или машиностроительной отраслях. Стоит отметить, что отдельным вопросом для дискуссий относительно применения подобных структур значится спектр используемых материалов, так как в самозаклинивающихся структурах в силу специфики их функционирования механические свойства материала часто не являются ограничивающим фактором. Следовательно, в зависимости от конкретного применения инженерам открывается большое количество вариаций применения облегченных, экономически доступных, экологических и других материалов. Продемонстрированное ранее достаточно эффективное перераспределение приложенной нагрузки в сочетании с легко подбираемым под условия эксплуатации форм фактором и элементарными составными элементами делает многослойные самозаклинивающиеся структуры в прикладном смысле достаточно легко масштабируемыми под конкретные задачи, а их потенциальную транспортировку, обслуживание, ремонт – относительно простыми.

При этом нельзя не отметить и ряд критичных моментов. В частности, вопросом отдельных углубленных исследований должна стать устойчивость данных структур в условиях предельных (или экстремальных) режимов эксплуатации. Несмотря на то, что эти конструкции могут быть многоразовыми в

использовании или после ремонтов, до сих пор лимиты нагрузок, которые они могут таким образом гасить и перераспределять, достаточно не изучены. Затрудняется это, в свою очередь, междисциплинарным характером данной проблемы, зависящим как от конкретного случая применения, так и от частной вариации исполнения.

Список источников

1. Toughening by fragmentation – how topology helps / A.V. Dyskin, Y. Estrin, A.J. Kanel-Belov, E. Pasternak // *Advanced Engineering Mater.* 2001, vol. 3, pp. 885-888.
2. Topological interlocking of platonic solids: A way to new materials and structures / A.V. Dyskin, Y. Estrin, A.J. Kanel-Belov, E. Pasternak // *Phil. Mag. Lett.* 2003, vol. 83, pp. 197-203.
3. Fracture resistant structures based on topological interlocking with nonplanar contacts / A.V. Dyskin, Y. Estrin, E. Pasternak, H.C. Khor, A.J. Kanel-Belov // *Advanced Engineering Mater.* 2003, vol. 5, no. 3, pp. 116-119.
4. Канель-Белов А.Я. Самозаклинивающиеся структуры // *Квант. Физико-математический журнал для школьников и студентов.* 2009. Т. 1. С. 20-23.
5. The principle of topological interlocking in extraterrestrial construction / Dyskin A.V., Estrin Y., Pasternak E., Khor H.C., Kanel-Belov A.J. // *Acta Astronautica.* 2005, vol. 57, no. 1, pp. 10-21.
6. Topological interlocking of protective tiles for Space Shuttle / Y. Estrin, A.V. Dyskin, E. Pasternak, H.C. Khor,

- A.J. Kanel-Belov // *Phil. Mag. Letters*. 2003, vol. 83, pp. 351-355.
7. Interlocking properties of buckyballs / A.V. Dyskin, Y. Estrin, A.J. Kanel-Belov, E. Pasternak // *Physics Letters A*. 2003, vol. 319, pp. 373-378.
 8. Deformation mechanics of non-planar topologically interlocked assemblies with structural hierarchy and varying geometry / L. Djumas, G.P. Simon, Y. Estrin et al. // *Scientific Reports*. 2017, vol. 7, no. 1, 11844. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-12147-3>
 9. Transverse loading of cellular topologically interlocked materials / S. Khandelwal, T. Siegmund, R.J. Cipra, J.S. Bolton // *Int. J. Solids Struct.* 2012, vol. 49, no. 18, pp. 2394-2403.
 10. Adaptive mechanical properties of topologically interlocking material systems / S. Khandelwal, R.J. Cipra, J.S. Bolton, T. Siegmund // *Smart Mater. Struct.* 2015, vol. 24, no. 4, 045037.
 11. Impact mechanics of topologically interlocked material assemblies / Y. Feng, T. Siegmund, E. Habtour, J. Riddick // *Intl. J. Impact Eng.* 2015, vol. 75, pp. 140-149.
 12. Manufacture and mechanics of topologically interlocked material assemblies / T. Siegmund, F. Barthelat, R.J. Cipra, Ed. Habtour, J. Riddick // *Applied Mechanics Reviews*. 2016, vol. 68, no. 4, 041401-1.
 13. Mather A., Cipra R.J., Siegmund T. Structural integrity during remanufacture of a topologically interlocked material // *Int. J. Struct. Integr.* 2012, vol. 3, no. 1, pp. 61-78.
 14. Применение самозаклинивающихся структур: демонстрация концепции на основе КЭ-моделирования / Константинов Д.В., Матвеев С.В., Песин А.М., Корчунов А.Г., Пивоварова К.Г. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2023. Т. 21. №1. С. 93-99. DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-1-93-99
 4. Kanel-Belov A.J. Interlocking structures. *Kvant. Fiziko-matematicheskii zhurnal dlya shkolnikov i studentov* [Quantum. Journal of Physics and Mathematics for School and University Students]. 2009;1:20-23. (In Russ.)
 5. Dyskin A.V., Estrin Y., Pasternak E., Khor H.C., Kanel-Belov A.J. The principle of topological interlocking in extraterrestrial construction. *Acta Astronautica*. 2005;57(1):10-21.
 6. Estrin Y., Dyskin A.V., Pasternak E., Khor H.C., Kanel-Belov A.J. Topological interlocking of protective tiles for Space Shuttle. *Phil. Mag. Letters*. 2003;83:351-355.
 7. Dyskin A.V., Estrin Y., Kanel-Belov A.J., Pasternak E. Interlocking properties of buckyballs. *Physics Letters A*. 2003;319:373-378.
 8. Djumas L., Simon G.P., Estrin Y. et al. Deformation mechanics of non-planar topologically interlocked assemblies with structural hierarchy and varying geometry. *Scientific Reports*. 2017;7(1):11844. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-12147-3>.
 9. Khandelwal S., Siegmund T., Cipra R.J., Bolton J.S. Transverse loading of cellular topologically interlocked materials. *Int. J. Solids Struct.* 2012;49(18):2394-2403.
 10. Khandelwal S., Cipra R.J., Bolton J.S., Siegmund T. Adaptive mechanical properties of topologically interlocking material systems. *Smart Mater. Struct.* 2015;24(4):045037.
 11. Feng Y., Siegmund T., Habtour E., Riddick J. Impact mechanics of topologically interlocked material assemblies. *Intl. J. Impact Eng.* 2015;75:140-149.
 12. Siegmund T., Barthelat F., Cipra R.J., Habtour E., Riddick J. Manufacture and mechanics of topologically interlocked material assemblies. *Applied Mechanics Reviews*. 2016;68(4):040803.
 13. Mather A., Cipra R.J., Siegmund T. Structural integrity during remanufacture of a topologically interlocked material. *Int. J. Struct. Integr.* 2012;3(1):61-78.
 14. Konstantinov D.V., Matveev S.V., Pesin A.M., Korchunov A.G., Pivovarova 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.) <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-93-99>

References

1. Dyskin A.V., Estrin Y., Kanel-Belov A.J., Pasternak E. Toughening by fragmentation – how topology helps. *Advanced Engineering Mater.* 2001;3:885-888.
2. Dyskin A.V., Estrin Y., Kanel-Belov A.J., Pasternak E. Topological interlocking of platonic solids: A way to new materials and structures. *Phil. Mag. Lett.* 2003;83:197-203.
3. Dyskin A.V., Estrin Y., Pasternak E., Khor H.C., Kanel-Belov A.J. Fracture resistant structures based on topological interlocking with nonplanar contacts. *Advanced Engineering Mater.* 2003;5(3):116-119.

Поступила 09.11.2023; принята к публикации 23.01.2024; опубликована 28.03.2024
Submitted 09/11/2023; revised 23/01/2024; published 28/03/2024

Константинов Дмитрий Вячеславович – кандидат технических наук, научный сотрудник, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: const_dimon@mail.ru. ORCID 0000-0003-3979-9940

Песин Александр Моисеевич – доктор технических наук, профессор, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: pesin@bk.ru. ORCID 0000-0002-5443-423X

Пивоварова Ксения Григорьевна – доктор технических наук, доцент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: kgpivovarova@gmail.com.

Dmitrii V. Konstantinov – PhD (Eng.), researcher, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: const_dimon@mail.ru. ORCID 0000-0003-3979-9940

Aleksandr M. Pesin – DrSc (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: pesin@bk.ru. ORCID 0000-0002-5443-423X

Kseniia G. Pivovarova – DrSc (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: kgpivovarova@gmail.com.

ЭКОЛОГИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

INDUSTRIAL ECOLOGY IN METALLURGY

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 502.13:665.6
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-1-166-173



DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF THE ENVIRONMENTAL MANAGEMENT SYSTEM GIVEN THE ADAPTATION OF RESOURCE-SAVING TECHNOLOGIES, USING THE EXAMPLE OF THE KOGALYMENERGONEFT SERVICE CENTER

Tsareva S.A., Belov A.V., Tsarev Yu.V.

Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The introduction of an environmental management system is an important step for the development of enterprises. It allows you to assess environmental risks and opportunities and monitor compliance with environmental requirements. Using this system, enterprises can develop measures to reduce the negative impact on the environment, which helps improve the environmental situation in the region. The implementation of an environmental management system is a responsible approach to business activities and an important element of sustainable development of enterprises. **Objectives.** The paper aims to solve the environmental sustainability issues of the Kogalymenergoneft Service Center within the framework of the environmental management system. **Methods Applied.** GOST R ISO 14001-2016 “Environmental management systems. Requirements with guidance for use” was used as a development tool. **Originality.** We identified significant environmental aspects of the enterprise’s functioning. To determine significance of every environmental aspect, we calculated the total environmental impact and assessed environmental sustainability of the resource extraction enterprise. **Result.** The highest significance among the analyzed aspects is attributed to such environmental aspect as “emissions of pollutants into hydrosphere” caused by a pollutant, iron oxide. Based on the chosen classification of environmental sustainability, we can classify the organization as an enterprise with medium sustainable development. **Practical Relevance.** The obtained results served as the basis for developing a methodology for assessing the role of resource-saving technologies in improving environmental sustainability.

Keywords: environmental management, environmental aspects, environmental sustainability, Kogalymenergoneft SC

© Tsareva S.A., Belov A.V., Tsarev Yu.V., 2024

Для цитирования

Tsareva S.A., Belov A.V., Tsarev Yu.V. Development and Implementation of the Environmental Management System Given the Adaptation of Resource-Saving Technologies, Using the Example of the Kogalymenergoneft Service Center *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 1, pp. 166-173. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-166-173>



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

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ СИСТЕМЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МЕНЕДЖМЕНТА В УСЛОВИЯХ АДАПТАЦИИ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ НА ПРИМЕРЕ СЕРВИСНОГО ЦЕНТРА «КОГАЛЫМЭНЕРГОНЕФТЬ»

Царева С.А., Белов А.В., Царев Ю.В.

Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Внедрение системы экологического менеджмента является важным шагом для развития предприятий. Она позволяет оценивать связанные с экологией риски и возможности, а также следить за соблюдением требований в области охраны окружающей среды. С помощью этой системы предприятия могут разрабатывать меры по снижению негативного влияния на окружающую среду, что способствует улучшению экологической обстановки в регионе. Внедрение системы экологического менеджмента является ответственным подходом к деловой деятельности и важным элементом устойчивого развития предприятий. **Цель работы.** Целью работы является решение вопросов экологической устойчивости сервисного центра «Когалымэнергонефть» в рамках системы экологического менеджмента. **Используемые методы.** В качестве инструмента разработки использовался ГОСТ Р ИСО 14001-2016 «Системы экологического менеджмента. Требования и руководство по применению». **Новизна.** Выявлены важные экологические аспекты функционирования предприятия. Для определения значимости каждого экологического аспекта рассчитано суммарное воздействие на окружающую среду и выполнена оценка экологической устойчивости ресурсодобывающего предприятия. **Результат.** Проанализирована процессная модель системы экологического менеджмента предприятия. Среди анализируемых аспектов предприятия наибольшее значение имеет такой экологический аспект, как «выбросы загрязняющих веществ в гидросферу», содержащие загрязняющее вещество – оксид железа. На основании выбранной классификации экологической устойчивости можно отнести рассматриваемую организацию к предприятию со средним устойчивым развитием. **Практическая значимость.** Полученные результаты послужили основой для разработки методики оценки роли ресурсосберегающих технологий в повышении экологической устойчивости предприятия.

Ключевые слова: экологический менеджмент, экологические аспекты, экологическая устойчивость, СЦ «Когалым-энергонефть»

Для цитирования

Царева С.А., Белов А.В., Царев Ю.В. Разработка и внедрение системы экологического менеджмента в условиях адаптации ресурсосберегающих технологий на примере сервисного центра «Когалымэнергонефть» // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №1. С. 166-173. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-166-173>

Introduction

Currently, a significant amount of experience in the operation of environmental management systems has already been accumulated, which has made it possible to form the necessary documentation and recommendations for use on an international scale [3, 14, 15]. Thus, the study [2] considers the practical task of classifying industrial enterprises by the level of sustainable development. The problem is studied as a multi-criteria classification problem. The study described the procedure for applying the CYCLE method for the problem under consideration. In [17], the authors studied the relationship between environmental management and the economic performance of 246 Chinese companies. This study divides environmental management into two dimensions: the breadth of environmental management breadth (EMB) and the depth of environmental management depth (EMD). Verification of the hypotheses put forward is carried out using multiple regression analysis. The results of the study showed an inverted U-shaped relationship between EMB and economic

indicators. EMD has a positive effect on economic indicators. Green innovation mediates the relationship between EMB (EMD) and economic performance. The study [6] notes that as the understanding of interactions present in socio-ecological systems develops, simulation using emulation can help reduce the complexity and necessary computational resources of models used to describe systems. Although emulation is commonly used in meta-analysis and parameterization of models, it is less studied in environmental management. Reducing simulation execution time is an essential motivation because emulators allow stakeholders to interact directly with the model.

The study [9] showed that small and medium-sized companies in their production processes and supply chains should go beyond the mandatory actions imposed by governments regarding environmental management. In addition, the environmental requirements of large companies can contribute to the consolidation of environmental management practices in small and medium-sized companies through cooperation, knowledge expansion, and the development of responsible behavior. In the study

[16], the authors conclude that the effectiveness of the integration of quality management and environmental management may depend on the internalization of both qualitative and environmental components. When the implementation of a system is superficial, it leads to excessive formalization and separation from daily activities and to an increase in bureaucracy in the organization. Conversely, if environment and quality are introduced into the organization's management system everywhere, this fact contributes to strengthening the effect of implementation, motivating organizational learning, developing internal competencies, and improving organizational efficiency, as a resource-oriented approach suggests.

Based on the analysis of existing approaches to forming an environmental strategy, the authors [13] developed an algorithm for forming an organization's environmental development strategy consisting of eight stages. Researchers assume that the structure and content of the proposed stages for individual organizations will vary depending on the form of ownership, size of the organization, industry affiliation, organizational structure, specifics of activity, etc. [13].

The authors [10] note that the implementation and use of environmental management systems (EMS) depend on the reliability of their certificates. To assess the degree of trust in the study, focus group interviews were conducted with 20 representatives of the manufacturing industry, the education sector, certification bodies, and non-profit environmental organizations. The paper emphasizes the importance of strict audit and control systems for certification. The paper [4] considers the possibility of integrating a closed-loop economy into an EMS based on ISO 14001. The authors suggest using a mixed strategy consisting of three stages. The authors of the studies [8, 11] confirm the importance of implementing environmental management systems in accordance with the ISO 14001 standard for enterprises in the electricity generation sector. The result of the implementation of EMS at the enterprise is a clear reduction in environmental impact. Competent management of the organization in environmental issues becomes an essential factor of sustainable development.

Materials and methods

The object of the study is the organization Kogalymenergoneft Service Center (SC). It is engaged in the maintenance and operation of electrical equipment and heat supply in the Khanty-Mansiysk and Yamalo-Nenets Autonomous Okrug. Kogalymenergoneft is the largest service center in the West Siberian Department. The main types of technological equipment in the Kogalymenergoneft SC are:

- Pump units (Artesian wells, network, water make-up, circulation pumps);
- Boilers;
- Water treatment equipment (Water storage tanks, filters);
- Heating networks (Main pipelines, water pipelines).

The tasks of effective management of the enterprise's equipment are:

- Reduction of energy resource costs for the operation and maintenance of equipment;
- Increased equipment performance;
- Reduction of energy loss in the production of heat, water supply, and sanitation.

The management manual "Industrial safety, labor protection and Environmental management system" has been developed at the Kogalymenergoneft SC enterprise. The manual was developed for improving the company's mechanisms for implementing procedures and unified information and regulatory support for work aimed at ensuring industrial safety, labor protection, and the environment and eliminating duplication of functions of their participants.

The management system is based on the principles set out in international standards [15] and operates in full compliance with the company's organizational structure. Fig. 1 shows the process model of the environmental management system of the Kogalymenergoneft SC.

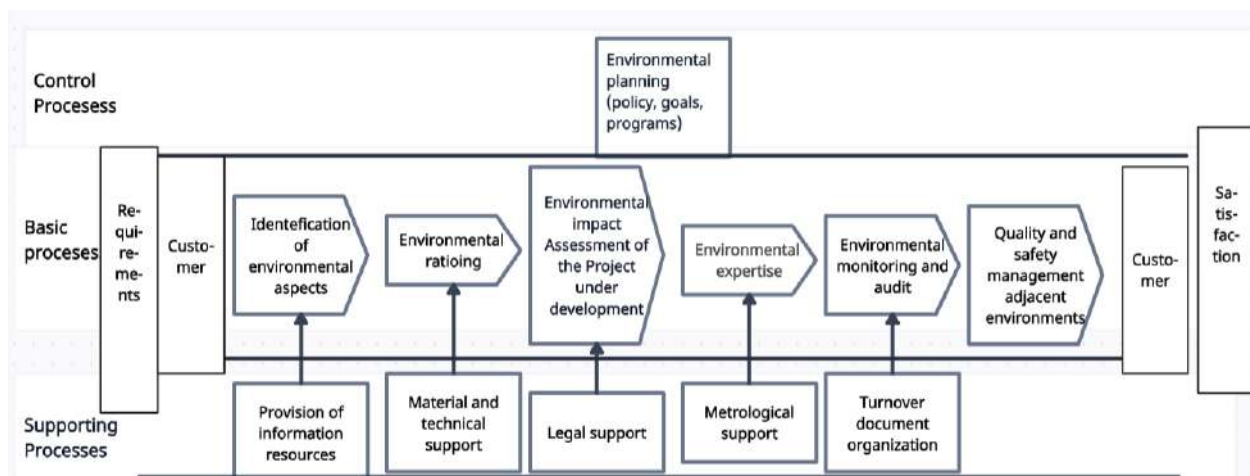


Fig. 1. The process model of the environmental management system of Kogalymenergoneft SC

Рис. 1. Процессная модель системы экологического менеджмента СЦ «Когалымэнергонефть»

Kogalymenergoneft SC defines its environmental aspects (EA) and the environmental impacts associated with them. It determines significant impacts. Therefore, one should consider the enterprise's environmental management system. EA identification was based on data [7].

When assessing the significance of the environmental impacts of an organization's actions, one should consider normal operating conditions and the start and completion of activities, and reasonably anticipated abnormal situations. One should consider past, existing, and future actions.

The requirements of the international standard ISO 14001:2015 is focused on identification of environmental aspects, related to the products of production and the activities of the enterprise, assessing their impact on the environment and developing a system aimed at reducing environmental impact.

Criteria requirements for the effective functioning of EMS are associated with the identification of significant environmental aspects and related environmental impacts, taking into account the prospects of the life cycle, taking into account the identified anomalous and potential emergencies. Therefore, it is assumed that the enterprise considers the identification of environmental aspects in normal production conditions and potentially in emergency

conditions. In connection with the above, for many enterprises with existing EMS, a detailed inventory of environmental aspects will be required, especially from the point of view of the life cycle approach, which in turn necessitates the use of life cycle assessment tools for products. The international standard for Life Cycle Assessment ISO 14040:2006 defines life cycle assessment (LCA) how to compile and evaluate input data, output data and the potential impact of technological productions on the environment.

Based on the mentioned provisions, we obtained formula (1).

To determine the EA significance, we calculated the total impact on the environment using the formula:

$$T_i = S_i \cdot I_i \cdot P_i \cdot D_i, \quad (1)$$

where S_i is the impact scale of EA; I_e is the intensity (severity) of EA impact; P_i is the probability of EA impact; D_i is the duration of EA impact (**Table 1**).

We attribute to significant EA the indicators equal to or more than 36. The assessment of the sustainability of the development of an industrial enterprise should be carried out in the aspects of external and internal sustainability.

Table 1. The EA significance rating scale [1]
Таблица 1. Шкала оценок значимости ЭА [1]

Impact factors	Values, in points
Impact scale of EA (S_i) within:	
Places of work	1
Object as a whole	2
Nearby territory	3
District and more	4
the intensity (severity) of EA impact (I_i):	
Impact within the limits of permissible legally-established norms	1
Exceeding the maximum permissible, legally established norms with minor consequences for the environment	2
Exceeding the maximum permissible legally-established norms with significant consequences for the environment	3
Probability of EA impact (P_i):	
Random rare events (small)	1
Recurring events (average)	2
Frequent recurring events or constant exposure (high)	3
Duration of impact on EA (D_i):	
Within a few hours	1
Within days	2
For a long time or permanently	3

The basis for the proposed scale of assessments (see **Table 1**) is an expert assessment of four interrelated variables with equal weight: (1) economic, (2) social, (3) risk tolerance and (4) environmental [12]. The experts were the leading specialists at the enterprise for the development and maintenance of the environmental management system. The experts were asked to choose the value that best describes the marked variables in the enterprise on a scale from one to four points. The first variable is the scale of the impact of environmental aspects, which ultimately determines the economic costs associated with ensuring environmental protection. The second variable reflects the intensity of the impact of the environmental aspect in the context of the social well-being of the population living next to the production enterprise under consideration. The third variable is determined by the probability of environmental impact, which determines the sustainability of the environmental management system to negative risks, and finally, the fourth variable characterizes the duration of the environmental impact, thereby assessing the anthropogenic impact on environmental conditions.

Environmental sustainability is the relationship between the economy of the enterprise and its environmental safety, minimizing the harmful impact of the production and economic activities of the enterprise on the environment. **Table 2** shows the criteria for the analysis of environmental sustainability.

Table 2. Environmental sustainability of the resource-extracting enterprise
Таблица 2. Экологическая устойчивость ресурсодобывающего предприятия

Analysis criteria	Indicators
Environmental safety	Coefficient of resource-saving technologies
	Coefficient of environmental protection measures
Impact of activities on the environment	Environmental pollution coefficient
	Coefficient of environmental intensity

We calculated the environmental sustainability indicator using the formula [5]:

$$S_e = \sqrt[4]{C_{rt} \cdot C_{ep} \cdot C_e \cdot E_i}, \quad (2)$$

where C_{rt} is Coefficient of resource-saving technologies; C_{ep} is Environmental pollution coefficient; C_e is the coefficient of environmental protection measures; E_i is the coefficient of environmental intensity.

The characteristic of the state of the environmental sustainability indicator at the enterprise is carried out using data [5].

The results obtained serve as a basis for the development of further recommendations to improve environmental sustainability.

Results and discussion

We developed the process of EA identification for the organization, and the decomposition of this process was carried out. **Fig. 2** shows the result.

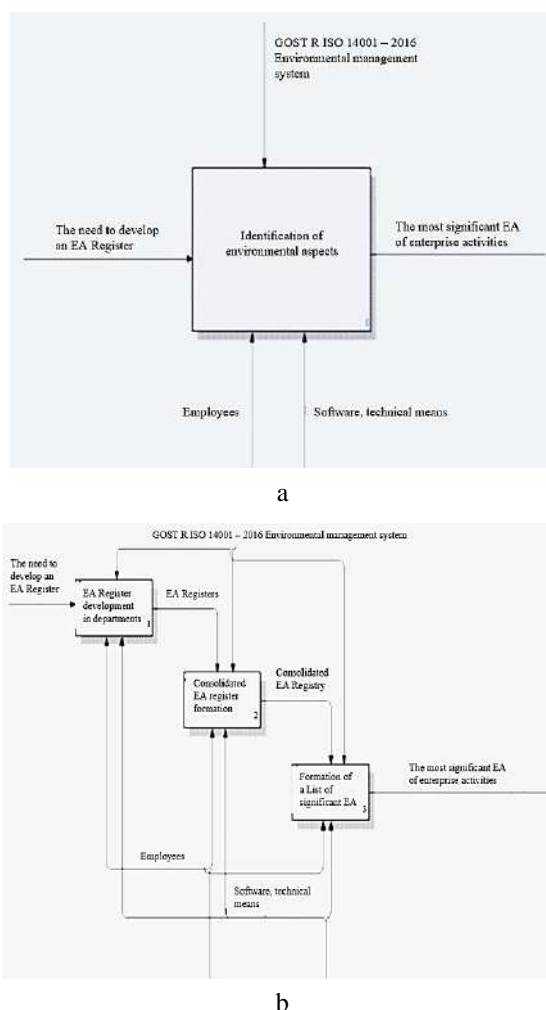


Fig. 2. The process of EA identification (a) and its decomposition (b) (compiled by the authors)

Рис. 2. Процесс идентификации ЭА (a) и декомпозиция процесса идентификации ЭА (b) (составлено авторами)

The output of the EA identification process is a register of the most significant EA. **Table 3** shows the EA register.

To determine the EA significance, we calculated the total environmental impact using the formula (1). **Table 4** shows the results of calculating the EA significance.

Furthermore, we calculated the integral indicator of environmental sustainability by taking the average $C_{rt} = 0.87$.

$$S_e = \sqrt[4]{0.87 \cdot 0.37 \cdot 0.8 \cdot 0.7} = 0.65.$$

Based on the data in **Table 4**, we can conclude that the highest value has such an environmental aspect as “emissions of pollutants into the hydrosphere” caused by a pollutant, iron oxide.

Table 3. EA register
Таблица 3. Реестр ЭА

Environmental aspect	Polluting substance	Environmental impact	Environmental aspect significance
Emissions of pollutants into the hydrosphere	Iron oxide	Water pollution	High
Emissions of pollutants into the hydrosphere	Manganese and its inorganic compounds	Water pollution	Average
Wastewater discharges into water bodies	Iron	Water pollution	Average
Wastewater discharges into water bodies	Oil products	Water pollution	Average

Table 4. EA significance calculation
Таблица 4. Расчет значимости ЭА

Environmental aspect	Polluting substance	S_i	I_i	P_i	D_i	T_s
Emissions of pollutants into the hydrosphere	Iron oxide	3	2	3	3	54
Emissions of pollutants into the hydrosphere	Manganese and its inorganic compounds	2	1	2	3	12
Wastewater discharges into water bodies	Iron	3	1	1	2	6
Wastewater discharges into water bodies	Oil products	3	2	2	2	24

According to the chosen classification (see **Table 4**), we can define the enterprise as the enterprise with medium sustainable development. The obtained results served as the basis for the development of a methodology for assessing the role of resource-saving technologies in improving environmental sustainability and the development of measures to improve the sustainability of the environmental management system, namely:

- To identify and evaluate significant EA.
- To evaluate the role of resource-saving technologies.

To adapt the methodology for assessing the role of resource-saving technologies in improving environmental sustainability.

Conclusions

We analyzed the activities of the enterprise Kogalymenergoneft SC, which is the largest service center in the West Siberian Federal District.

We analyzed the standards in the field of environmental management GOST R ISO 14001-2016.

In addition, we analyzed the methods of assessing the contribution of resource-saving technologies in improving the sustainability of the environmental management system.

We developed the methodology for assessing the role of resource-saving technologies in improving environmental sustainability.

References

1. Feraru G.S. Methodological aspects of establishing an environmental management system at the enterprise. *Ekonomika prirodopolzovaniya* [Environmental Economics]. 2009;(1):25-37. (In Russ.)
2. Khomyachenkova N.A. A method of a multi-criteria classification of industrial enterprises by groups of sustainable development. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Prikladnaya matematika* [Herald of Tver State University. Series: Applied Mathematics]. 2010;(4(37)):81-96. (In Russ.)
3. Korobko V.I. *Ekologicheskiy menedzhment* [Environmental management]. Moscow: YuNITI-DANA, 2015, 306 p. (In Russ.)
4. Kristensen H.S., Mosgaard M.A., Remmen A. Integrating circular principles in environmental management systems. *Journal of Cleaner Production*. 2021;286:125485.
5. Krivoguzova N.A. Methodological aspects used to assess sustainability of development of the enterprise. *Problemy i perspektivy industrialno-innovatsionnogo razvitiya v Evraziyskom ekonomicheskom soyuze (EAES): tez. dokl. Mezhd. nauchn. konf* [Problems and prospects of industrial and innovative development in the Eurasian Economic Union (EAEU): abstracts of the International Scientific Conference]. Karaganda: Karaganda Industrial University, 2014, vol. 2, pp. 81-86. (In Russ.)
6. Lim T.C. Model emulators and complexity management at the environmental science-action interface. *Environmental Modelling & Software*. 2021;135:104928.
7. Lukoil Neftochim Burgas AD. Ecology. Available at: <https://neftochim.lukoil.com/ru/Responsibility/Ecology/> (accessed on September 05, 2023).
8. Lyapina A.D. Environmental management systems at power engineering enterprises in Russia. *Modern Science*. 2020;(6-3):100-103. (In Russ.)
9. Machado M.C., Vivaldini M., Oliveira O.J. Production and supply-chain as the basis for SMEs' environmental management development: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*. 2020;273:123141.
10. Nowicki P., Ćwiklicki M., Kafel P., Wojnarowska M. Credibility of certified environmental management systems: Results from focus group interviews. *Environmental Impact Assessment Review*. 2021;88:106556.
11. Ratner S.B., Sinelnikova A.V. Developing a method of assessing efficiency of environmental management systems of power engineering companies. *Finansovaya analitika: problemy i resheniya* [Financial Analytics: Science and Experience]. 2017;10(9):1048-1061. (In Russ.)

12. Saradzheva O.V. A historical analysis of development of small and medium-sized entrepreneurship in Russia. *Vestnik Moskovskogo universiteta MVD Rossii* [Vestnik of Moscow University of the Ministry of Internal Affairs of Russia]. 2014;(5):179-182. (In Russ.)
13. Shipilov N.Yu., Kopaigorodskaya A.P. Environmental management: a strategic aspect. *Aktualnye problemy ekonomiki i menedzhmenta* [Current Issues of Economics and Management]. 2020;(5(25)):184-190. (In Russ.)
14. GOST R ISO 45001-2020. Occupational health and safety management systems. Requirements with guidance for use. Approved and enforced by Order of the Federal Agency on Technical Regulation and Metrology No.581-st. dated August 28, 2020. Available at: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293719/4293719376.htm> (accessed on September 24, 2023).
15. GOST R ISO 14001-2016. Environmental management systems. Requirements with guidance for use. Approved and enforced by Order of the Federal Agency on Technical Regulation and Metrology No.285-st. dated April 29, 2016. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200134681> (accessed on September 24, 2023).
16. Vasilenok V.L., Kochegarova T.S. Integration of quality management and environmental management: foreign practices. *Strategii i instrumenty upravleniya ekonomikoy: otraslevoy i regionalny aspekt: tez. dokl. VIII Mezhd. nauchn.-prakt. konf.* [Strategies and tools of economic management: sector-specific and regional aspects: abstracts of the 8th International Scientific and Practical Conference]. Saint Petersburg: ITMO National Research University, 2019, pp. 402-406. (In Russ.)
17. Zhang Q., Ma Y. The impact of environmental management on firm economic performance: The mediating effect of green innovation and the moderating effect of environmental leadership. *Journal of Cleaner Production*. 2021;292:126057. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126057.
18. Сараджева О.В. Исторический анализ развития малого и среднего предпринимательства в России // Вестник Московского университета МВД России. 2014. Т. 2. С. 81-86.
19. Lim T.C. Model emulators and complexity management at the environmental science-action interface // *Environmental Modelling & Software*. 2021, vol. 135, 104928.
20. «Лукойл Нефтехим Бургас» АД. Экология [Электронный ресурс]. URL: <https://neftochim.lukoil.com/ru/Responsibility/Ecology/> (дата обращения: 05.09.2023).
21. Ляпина А.Д. Системы экологического менеджмента на энергетических предприятиях России // *Modern Science*. 2020. №6-3. С. 100-103.
22. Machado M.C., Vivaldini M., Oliveira O.J. Production and supply-chain as the basis for SMEs' environmental management development: A systematic literature review // *Journal of Cleaner Production*. 2020, vol. 273, 123141.
23. Nowicki P., Ćwiklicki M., Kafel P., Wojnarowska M. Credibility of certified environmental management systems: Results from focus group interviews. *Environmental Impact Assessment Review*. 2021, vol. 88, 106556.
24. Ратнер С.Б., Синельникова А.В. Разработка методики оценки эффективности систем экологического менеджмента энергетических компаний // Финансовая аналитика: проблемы и решения. 2017. Т. 10. Вып. 9. С. 1048-1061.
25. Сараджева О.В. Исторический анализ развития малого и среднего предпринимательства в России // Вестник Московского университета МВД России. 2014. №5. С. 179-182.
26. Шипилов Н.Ю., Копайгородская А.П. Экологический менеджмент: стратегический аспект // *Актуальные проблемы экономики и менеджмента*. 2020. №5(25). С. 184-190.
27. ГОСТ Р ИСО 45001-2020. Системы менеджмента безопасности труда и охраны здоровья. Требования и руководство по применению. Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 августа 2020 г. № 581-ст. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293719/4293719376.htm> (дата обращения: 24.09.2023).
28. ГОСТ Р ИСО 14001-2016. Системы экологического менеджмента. Требования и руководство по применению. Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 апреля 2016 г. № 285-ст. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200134681>. (дата обращения: 24.09.2023).
29. Василенок В.Л., Кочегарова Т.С. Интеграция менеджмента качества и экологического менеджмента: зарубежный опыт // *Стратегии и инструменты управления экономикой: отраслевой и региональный аспект: тез. докл. VIII Межд. научн.-практ. конф.* СПб.: Национальный исследовательский университет ИТМО, 2019. С. 402-406.

Список литературы

1. Ферару Г.С. Методологические аспекты формирования системы экологического менеджмента на предприятии // *Экономика природопользования*. 2009. №1. С. 25-37.
2. Хомяченкова Н.А. Методика многокритериальной классификации промышленных предприятий по группам устойчивого развития // *Вестник Тверского государственного университета. Серия: Прикладная математика*. 2010. №4(37). С. 81-96
3. Коробко В.И. Экологический менеджмент. Москва: ЮНИТИ-ДАНА, 2015. 306 с.
4. Kristensen H.S., Mosgaard M.A., Remmen A. Integrating circular principles in environmental management systems // *Journal of Cleaner Production*. 2021, vol. 286, 125485.
5. Кривогузова Н.А. Методологические аспекты оценки устойчивости развития предприятия // *Проблемы и перспективы индустриально-инновационного развития в Евразийском экономическом союзе (ЕАЭС): тез. докл. Межд. научн. конф. Караганда: КИУ, 2014. Т. 2. С. 81-86.*

17. Zhang Q., Ma Y. The impact of environmental management on firm economic performance: The mediating effect of green innovation and the moderating effect of environmental leadership // Journal of Cleaner Production. 2021, vol. 292, 126057. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126057.

Поступила 01.11.2023; принята к публикации 04.12.2023; опубликована 28.03.2024
Submitted 01/11/2023; revised 04/12/2023; published 28/03/2024

Sophia A. Tsareva – PhD (Chemistry), Associate Professor,
Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia.
Email: tsarevasa@ystu.ru. ORCID 0000-0003-2099-4885

Aleksey V. Belov – PhD (Economics), Associate Professor,
Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia.
Email: belovav@ystu.ru. ORCID 0000-0003-0445-3384

Yuri V. Tsarev – PhD (Eng.), Associate Professor,
Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia.
Email: tsarevyv@ystu.ru. ORCID 0000-0002-4337-2897

Царева Софья Александровна – кандидат химических наук, доцент,
Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Россия.
Email: tsarevasa@ystu.ru. ORCID 0000-0003-2099-4885

Белов Алексей Владимирович – кандидат экономических наук, доцент,
Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Россия.
Email: belovav@ystu.ru. ORCID 0000-0003-0445-3384

Царев Юрий Валерьевич – кандидат технических наук, доцент,
Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Россия.
Email: tsarevyv@ystu.ru. ORCID 0000-0002-4337-2897

ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И РЫНОК ПРОДУКЦИИ

ECONOMICS, MANAGEMENT AND PRODUCT MARKET

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 339.13:669.1
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-1-174-184



МАРКЕТИНГОВЫЙ АНАЛИЗ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ СЕРВИСНОЙ КОМПАНИИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Кузнецова М.В.¹, Зиновьева Е.Г.¹, Селиванов А.С.²

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

² ООО «ОСК», Магнитогорск, Россия

Аннотация. В последние несколько лет металлургические предприятия вынуждены функционировать в сложных экономических условиях, сталкиваются с большим количеством препятствий, требующих оперативного принятия решений. В начале 2022 года металлургические предприятия вынуждены были перестраивать свою работу в условиях жестких санкционных ограничений со стороны западных стран. В последние годы многие металлургические предприятия выстраивают стратегию своего развития с учетом необходимости обеспечения устойчивых темпов развития в условиях нестабильности внешней среды. Целью работы является проведение маркетингового анализа внешней среды сервисной компании металлургического предприятия на примере ООО «ОСК». Маркетинговый анализ внешней среды сервисной компании металлургического предприятия проводится с использованием STEEP-анализа, модели «5 сил» М. Портера и SWOT-анализа. Сервисная компания, несмотря на то, что ее основное предназначение – обслуживание нужд конкретного предприятия, является самостоятельным юридическим лицом и при разработке тактических и стратегических планов должна учитывать влияние внешней среды. Новизна исследования заключается в том, что проведенный маркетинговый анализ учитывает положение на рынке и влияние внешней среды не всей группы компаний ПАО «ММК», а сосредотачивает свое внимание на сервисной компании – ООО «ОСК». Это обусловлено, во-первых, тем, что организация не единолично удовлетворяет нужды ПАО «ММК» в ремонте и обслуживании оборудования – некоторые виды работ выполняют другие подрядные организации, во-вторых, ООО «ОСК» выполняет работы для других заказчиков. В результате проведенного анализа выделены внешние факторы, оказывающие наибольшее влияние на деятельность ООО «ОСК». Проведена оценка отрасли сервисной компании и определен уровень различных видов угроз в рамках конкурентной борьбы в отрасли. Выделены как сильные, так и слабые стороны ООО «ОСК» в рамках внешней и внутренней среды. По результатам проведенного анализа были сформулированы основные проблемы ООО «ОСК», вызванные отраслевыми особенностями, положением компании на рынке, политической и экономической ситуацией в стране и т.д. Для преодоления указанных проблем, минимизации их последствий были определены маркетинговые цели ООО «ОСК».

Ключевые слова: внешняя среда, STEEP-анализ, модель «5 сил» М. Портера, SWOT-анализ

© Кузнецова М.В., Зиновьева Е.Г., Селиванов А.С., 2024

Для цитирования

Кузнецова М.В., Зиновьева Е.Г., Селиванов А.С. Маркетинговый анализ внешней среды сервисной компании металлургического предприятия // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №1. С. 174-184. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-174-184>



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

A MARKETING ANALYSIS OF THE EXTERNAL ENVIRONMENT OF A SERVICE COMPANY OF A METALLURGICAL ENTERPRISE

Kuznetsova M.V.¹, Zinovyeva E.G.¹, Selivanov A.S.²

¹ Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

² LLC USC, Magnitogorsk, Russia

Abstract. In the last few years, metallurgical enterprises have been forced to operate in difficult economic conditions, face a large number of obstacles that require prompt decision-making. Early 2022, metallurgical enterprises were to rebuild their work under severe sanction restrictions from Western countries. In recent years, many metallurgical enterprises have been building a strategy for their development, taking into account the need to ensure a steady pace of development in the unstable external environment. The research is aimed at conducting a marketing analysis of the external environment of a service company of a metallurgical enterprise using the example of LLC USC. The marketing analysis of the external environment of the service company of the metallurgical enterprise is carried out using a STEEP analysis, M. Porter's Five Forces model, and a SWOT analysis. The service company, despite its main purpose of serving the needs of a particular enterprise, is an independent legal entity and should take into account the influence of the external environment when developing tactical and strategic plans. The novelty of the research lies in the fact that the conducted marketing analysis takes into account the market situation and the influence of the external environment not of the entire MMK group of companies, but focuses on the service company, LLC USC. Firstly, this is due to the fact that the organization does not solely satisfy the needs of PJSC MMK for repair and maintenance of equipment, as some types of work are performed by other contractors, and secondly, LLC USC performs work for other customers. The analysis results indicate the external factors that have the greatest impact on the activities of LLC USC. The authors assessed the service company's sector and determined a level of various types of threats within the framework of the competition in the sector. Both strengths and weaknesses of LLC USC were identified in terms of the external and internal environment. The analysis results showed main problems of LLC USC caused by sector-related special features, the company's position on the market, a political and economic situation in the country, etc. To overcome these problems and minimize their consequences, the authors determined the marketing goals of LLC USC.

Keywords: external environment, STEEP analysis, M. Porter's Five Forces model, SWOT analysis

For citation

Kuznetsova M.V., Zinovyeva E.G., Selivanov A.S. A Marketing Analysis of the External Environment of a Service Company of a Metallurgical Enterprise. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 1, pp. 174-184. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-174-184>

Введение

Основными характеристиками современного предприятия выступают его гибкость и умение адаптироваться к изменяющимся условиям внешней среды. Внешняя среда – это сфера, в которой организация осуществляет свою деятельность, совокупность факторов влияния вне организации. Руководство предприятия не может влиять на эти факторы непосредственно.

Внешняя среда, в которой приходится работать организации, находится в постоянном движении и подвержена изменениям. Изменяются рыночные структуры, появляются новые технологические процессы производства, могут произойти изменения в предпочтениях потребителей, рыночный курс рубля по отношению к другим иностранным валютам, изменения в законодательстве и налогообложении и т.д. Способность организации своевременно реагировать и справляться с данными изменениями внешней сре-

ды является частью успеха [1].

Для успешного функционирования компании необходимо своевременно проводить маркетинговый анализ ее внешней среды – как дальнего, так и ближнего окружения, ее будущих изменений. Это позволит фирме своевременно подготовиться к меняющимся внешним условиям, подстроившись под них. Оценка внутренней среды компании в виде выделения ее сильных и слабых сторон вместе с анализом внешней среды в виде определения возможностей и угроз фирмы позволяет сформировать рыночные цели развития компании и ее продукта в контексте меняющихся ожиданий потребителей [2].

Материалы и методы исследования

ООО «ОСК» – сервисная компания, созданная, в первую очередь, с целью повышения эффективности процесса аутсорсинга в Группе ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», то есть компания

была изначально создана для удовлетворения нужд ПАО «ММК». При этом ООО «ОСК» имеет возможность оказывать услуги и выполнять работы за пределами металлургического комбината и не только на его объектах, то есть заключать договоры с другими юридическими лицами.

ООО «ОСК» имеет возможность предоставлять своим заказчикам полный спектр услуг по наладке и проектированию систем по следующим направлениям:

- автоматизация (системы визуализации, системы автоматизации уровня 1, системы автоматизации уровня 2);

- электропривод (современного электропривода постоянного и переменного токов, электрооборудование отечественного и зарубежного производства);

- электроснабжение (электроснабжение до 110 кВ, в том числе распределительных устройств (на базе электромеханических реле и цифровых терминалов), комплектных трансформаторных подстанций, распределительных сетей и т.д.; сервисное, техническое обслуживание устройств РЗА);

- монтаж и диагностика оптических и медных линий связи (не в категории электроснабжения);

- автоматические системы технической диагностики электрооборудования (не в категории электроснабжения);

- системы видеонаблюдения;

- испытание и измерение параметров безопасности электрооборудования (электротехническая лаборатория участка располагает современными приборами для проведения измерений и испытаний электрооборудования, обеспечивающих безопасность эксплуатации электрических установок, а также высоковольтных испытаний средств защиты).

Объем услуг, оказываемый иным организациям, на несколько порядков меньше, чем услуги, оказываемые ПАО «ММК».

Помимо ПАО «ММК» компания сотрудничает с ОАО «ММК-МЕТИЗ», ООО «Механоремонтный комплекс», горнолыжными центрами «Абзаково» и «Металлург-Магнитогорск», другими обществами Группы ММК, а также с Новосибирским энергомашиностроительным заводом, Орско-Халиловским металлургическим комбинатом, ПАО «Ижсталь», предприятиями «Прокатмонтаж», «Монтажник», «Строительный комплекс», ООО «Огнеупор», ОАО «МЦОЗ», ООО «Шлаксервис».

Основной заказчик компании – ПАО «ММК».

Цель исследования – проведение маркетингового анализа внешней среды сервисной компании металлургического предприятия на примере ООО «ОСК».

Для маркетингового анализа внешней среды сервисной компании металлургического предприятия применены следующие методы исследования: STEEP-анализ, модель «5 сил» М. Портера, SWOT-анализ.

STEER-анализ позволяет структурировать воздействия дальнего внешнего окружения на компанию и выделить наиболее существенные из них на текущий момент или на стратегическую перспективу [3].

Модель «5 сил», используемая для отраслевого анализа, является связующим звеном между факторами дальнего внешнего окружения и внутренней средой организации. Целью отраслевого анализа является определение привлекательности отрасли и отдельных товарных рынков внутри нее. Такой анализ позволяет понять характерные для отрасли возможности и существующие угрозы, определить ключевые факторы успеха отрасли. Согласно М. Портеру, компания может оценить собственные конкурентные преимущества и слабые стороны, анализируя силы, которые влияют на конкуренцию в отрасли, и их основные причины [4].

SWOT-анализ – это метод, который позволяет оценить в комплексе внутренние и внешние факторы, влияющие на развитие компании. Это анализ сильных и слабых сторон организации, а также возможностей и угроз со стороны внешней окружающей среды [5].

Полученные результаты и их обсуждение

Для сохранения устойчивости компании и её дальнейшего развития необходимо оценивать и прогнозировать поведение внешнего окружения не только в виде потребителей, поставщиков и конкурентов, но и дальнее окружение организации. Как правило, у компании нет возможности влиять на факторы дальнего окружения, но она должна, как минимум, оперативно реагировать на их изменение, подстраиваясь под новые условия окружения. К числу факторов STEEP-анализа отрасли относятся социальные, технологические, экономические, экологические и политические факторы [6].

Основной услугой ООО «ОСК» является проектирование, изготовление, монтаж, наладка, обслуживание и ремонт электрического, энергетического, механического и гидравлического оборудования. Согласно классификатору отраслей народного хозяйства (ОКОНХ) деятельность ООО «ОСК» относится к отрасли «Машиностроение и металлообработка», сектор «Ремонт машин и оборудования» [7, 8].

В табличной форме отобразим характер влияния факторов на отрасль, в рамках которой действует ООО «ОСК» (табл. 1).

Таким образом, отметим, что к факторам, которые оказывают наибольшее влияние на деятельность ООО «ОСК», относятся социальные и экономические факторы. ООО «ОСК» очень сильно зависит от объемов промышленного производства, которое, в свою очередь, определяется спросом на конечную продукцию. Падение совокупного спроса сначала со стороны населения, а потом и производственных предприятий с определенной отсрочкой скажется на объемах деятельности ООО «ОСК».

Таблица 1. Влияние факторов дальнего окружения на деятельность ООО «ОСК»
Table 1. Influence of remote environment factors on the activities of LLC USC

Факторы	Проявление фактора	Особенности воздействия на деятельность компании
Социальные	Потребность в высококвалифицированном персонале различных категорий	Качество выполняемых работ анализируемой компании очень сильно зависит от уровня квалификации персонала. Неквалифицированный персонал даже при наличии высокотехнологичного оборудования и инструментария не сможет качественно выполнить поставленную задачу
	Миграция населения	1. Магнитогорск характеризуется миграционным оттоком коренного населения города. Уезжают из города преимущественно высококвалифицированные кадры трудоспособного возраста, способные трудоустроиться на новом месте. Миграционный приток представлен приезжими из азиатских республик бывшего СССР, не имеющих квалификации и не желающих ее получить. Таким образом, миграционный приток не покрывает миграционный отток. 2. Магнитогорские выпускники вузов иных городов не стремятся вернуться на историческую родину. 3. В целом наблюдается отток работников, в том числе с вредных и тяжелых производств
	Выбор будущей профессии и образовательного заведения выпускниками школ	1. Для работы в ООО «ОСК» на основных должностях требуется техническое образование, для получения которого необходимо сдать при поступлении в вуз профильную математику, физику, химию и т.п. В настоящее время магнитогорские выпускники не жалуют эти дисциплины, а следовательно, не имеют возможности получить техническое образование. 2. Выпускники ближайших населенных пунктов в большинстве своём выбирают дальнейшее обучение в более крупных городах, чем г. Магнитогорск 3. Престиж рабочих профессий по-прежнему невысок
Технологические	Совершенствование технологий производства различных отраслей промышленности, в том числе в металлургии	ООО «ОСК» вынуждено оперативно подстраиваться под меняющуюся технологию производства обслуживаемых им предприятий, а также само должно учитывать при выполнении работ новые технологии
Экономические	Численность промышленных предприятий и объем выпускаемой ими продукции	Объем выполняемых работ ООО «ОСК» напрямую зависит от объемов продукции тех предприятий, которые пользуются услугами ООО «ОСК». Экономические санкции увеличили напряженность данного вопроса. Переориентация предприятий на внутренний рынок, на других зарубежных партнёров будет способствовать увеличению объема выполняемых работ ООО «ОСК»
	Государственная налоговая политика	Повышение налоговых ставок, таможенных пошлин, акцизов приводят к увеличению цен на сырье, а также к увеличению издержек. Следовательно, необходимо работать над технологией выполнения работ с целью минимизации себестоимости
	Логистическая и транспортная система в РФ	Транспортные расходы в силу размеров страны оказывают достаточное влияние на структуру затрат многих организаций
	Инфляционные процессы в экономике	Этот фактор действует отрицательно, что проявляется в увеличении издержек, повышении цен на выпускаемую продукцию
Экологические	Законодательство в области охраны окружающей среды	Эволюция законодательства области охраны окружающей среды идет по пути ужесточения, в связи с этим увеличиваются и требования к качеству выполнения работ ООО «ОСК»
Политические	Наличие и качество дипломатических отношений с зарубежными странами	Напряженная политическая ситуация выливается в экономические проблемы для потребителей услуг ООО «ОСК»
	Состояние законодательства	Возможны отрицательные изменения в законодательстве, которые могут уменьшить прибыль и увеличить затраты предприятия

Серьезной проблемой является и дефицит квалифицированных кадров в г. Магнитогорске, и трудности с привлечением кадров из других населенных пунктов. Эта проблема характеризует многие отрасли, в том числе и анализируемую отрасль. Низкая квалификация персонала мешает овладению новыми технологиями

ремонта и обслуживания оборудования.

Оценим структуру конкуренции отрасли через модель «5 сил» Портера, который выделял пять основных сил, определяющих уровень прибыльности любого предприятия вне зависимости от отрасли функционирования (рис. 1).



Рис. 1. Силы, управляющие конкуренцией в любой отрасли (Портер) [9]

Fig. 1. Forces driving the competition in any sector (Porter) [9]

ПАО «ММК» пользуется услугами не только ООО «ОСК», но и заказывает выполнение работ сторонним организациям в том случае, если сервисная компания не обладает возможностями их выполнения. Перечислим основных ближайших конкурентов ООО «ОСК», действующих преимущественно в г. Магнитогорске и Челябинской области, а также оказывающих услуги ПАО «ММК». К их числу относятся ООО «ККТ» (<https://kkt.su>), ЗАО ПКТ «Парма-Сервис» (<http://parmaservice.ru>), ООО «СМС ЗИМАГ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ СЕРВИС МАГНИТОГОРСК», ООО «Уралдомнаремонт-М» (https://vk.com/udr_m), ООО «УСС» (УРАЛСИБСТРОЙ).

Анализ будет осуществлен на основе специальных критериев для каждой из 5-ти сил [4, 9].

В табл. 2 представлен результат анализа силы конкурентов.

Таблица 2. Анализ интенсивности соперничества между существующими конкурентами

Table 2. Analysis of the competitive intensity between existing competitors

Параметр оценки	Оценка параметра		
	3	2	1
Количество игроков	Высокий уровень насыщения рынка	Средний уровень насыщения рынка	Небольшое количество фирм на рынке
Темп роста рынка	Стагнация или снижение объема рынка	Замедляющийся, но растущий	Высокий
Уровень дифференциации продукта	Компании выполняют стандартизированную работу	Выполняемые услуги стандартизированы по ключевым свойствам, но отличаются по дополнительным преимуществам	Услуги/работы фирм значимо отличаются между собой
Ограничение в повышении цен	Жесткая ценовая конкуренция на рынке, отсутствуют возможности в повышении цен	Есть возможность к повышению цен только в рамках покрытия роста затрат	Всегда есть возможность к повышению цены для покрытия роста затрат и повышения прибыли
ИТОГОВЫЙ БАЛЛ	7 баллов		
4 балла	Низкий уровень внутриотраслевой конкуренции		
5-8 баллов	Средний уровень внутриотраслевой конкуренции		
9-12 баллов	Высокий уровень внутриотраслевой конкуренции		

Соперничество между конкурентами внутри отрасли находится на среднем уровне.

С помощью табл. 3 проведён анализ вероятности угрозы со стороны потенциальных конкурентов-новичков на рынке.

Вероятность появления новых конкурентов в данном сегменте не слишком высокая в силу необходимости значительных инвестиций, долгого срока их окупаемости и трудностей с получением заказов. Помимо этого, для выполнения достаточно большого количества работ необходима лицензия.

В табл. 4 представлен результат анализа угрозы появления заменителей (субституты) товаров или услуг.

В силу специфики деятельности ООО «ОСК» – выполнение монтажных и ремонтных работ – аналогов у данного продукта нет.

Табл. 5 содержит результаты анализа рыночной власти потребителей. Рыночная власть потребителей очень близка к высокой в силу того, что основным заказчиком работ ООО «ОСК» является ПАО «ММК».

Табл. 6 содержит результаты анализа рыночной власти поставщиков.

По результатам анализа формируем табл. 7, где указываем силу, её степень угрозы и небольшое описание, с чем это связано. В последнем столбце выделим те действия, которые должны способствовать преодолению угроз различных сил модели Портера.

Таблица 3. Анализ угрозы со стороны потенциальных конкурентов-новичков на рынке
 Table 3. Analysis of the threat from potential competitors, which are newcomers to the market

Параметр оценки	Оценка параметра		
	3	2	1
Экономия на масштабе при производстве товара или услуги	Отсутствует	Существует только у нескольких фирм в данном сегменте рынка	Значимая
Сильные марки с высоким уровнем знания и лояльности	Крупные фирмы отсутствуют	2-3 крупные фирмы держат около 50% рынка	2-3 крупные фирмы держат более 80% рынка
Дифференциация продукта	Низкий уровень разнообразия услуг	Существуют микронизи	Все возможные ниши заняты существующими фирмами
Уровень инвестиций и затрат для входа в отрасль	Низкий (окупается за 1-3 месяца работы)	Средний (окупается за 6-12 месяцев работы)	Высокий (окупается более чем за 1 год работы)
Доступ к каналам распределения	Доступ к каналам распределения полностью открыт	Доступ к каналам распределения требует умеренных инвестиций	Доступ к каналам распределения ограничен
Политика правительства	Нет ограничивающих актов со стороны государства	Государство вмешивается в деятельность отрасли, но на низком уровне	Государство полностью регламентирует отрасль и устанавливает ограничения
Готовность существующих игроков к снижению цен	Фирмы не пойдут на снижение цен	Крупные фирмы не пойдут на снижение цен	При любой попытке ввода более дешевого предложения фирмы снижают цены
Темп роста отрасли	Высокий и растущий	Замедляющийся	Стагнация или падение
ИТОГОВЫЙ БАЛЛ	11 баллов		
8 баллов	Низкий уровень угрозы входа новых игроков		
9-16 баллов	Средний уровень угрозы входа новых игроков		
17-24 балла	Высокий уровень угрозы входа новых игроков		

Таблица 4. Анализ угрозы появления заменителей (субститутов) товаров или услуг
 Table 4. Analysis of the threat from turning to substitutes of goods or services

Параметр оценки	Оценка параметра		
	3	2	1
Наличие товаров-заменителей	Существуют и занимают высокую долю на рынке	Существуют, но только вошли на рынок и их доля мала	Не существуют
ИТОГОВЫЙ БАЛЛ	1 балл		
1 балл	Низкий уровень угрозы со стороны товаров-заменителей		
2 балла	Средний уровень угрозы со стороны товаров-заменителей		
3 балла	Высокий уровень угрозы со стороны товаров-заменителей		

Таблица 5. Анализ рыночной власти потребителей
Table 5. Analysis of the market power of consumers

Параметр оценки	Оценка параметра		
	3	2	1
Доля покупателей с большим объемом продаж	Более 80% продаж приходится на нескольких клиентов	Незначительная часть клиентов держит около 50% продаж	Объем продаж равномерно распределен между всеми клиентами
Склонность к переключению на товары-субституты	Работы, выполняемые компанией, не уникальны, существуют полные аналоги	Работы, выполняемые компанией частично, уникальны, есть отличительные характеристики, важные для клиентов	Услуги компании полностью уникальны, аналогов нет
Чувствительность к цене	Покупатель всегда будет переключаться на услугу с более низкой ценой	Покупатель будет переключаться только при значимой разнице в цене	Покупатель абсолютно не чувствителен к цене
Потребители не удовлетворены качеством существующей услуги на рынке	Неудовлетворенность ключевыми характеристиками услуги	Неудовлетворенность второстепенными характеристиками услуги	Полная удовлетворенность качеством
ИТОГОВЫЙ БАЛЛ	8 баллов		
4 балла	Низкий уровень угрозы ухода клиентов		
5-8 баллов	Средний уровень угрозы ухода клиентов		
9-12 баллов	Высокий уровень угрозы потери клиентов		

Таблица 6. Анализ рыночной власти поставщиков
Table 6. Analysis of the market power of suppliers

Параметр оценки	Оценка параметра	
	2	1
Количество поставщиков	Незначительное количество поставщиков или монополия	Широкий выбор поставщиков
Ограниченность ресурсов поставщиков	Ограниченность в объемах	Неограниченность в объемах
Издержки переключения	Высокие издержки к переключению на других поставщиков	Низкие издержки к переключению на других поставщиков
Приоритетность направления для поставщика	Низкая приоритетность отрасли для поставщика	Высокая приоритетность отрасли для поставщика
ИТОГОВЫЙ БАЛЛ	5 баллов	
4 балла	Низкий уровень влияния поставщиков	
5-6 баллов	Средний уровень влияния поставщиков	
7-8 баллов	Высокий уровень влияния поставщиков	

Таблица 7. Результат анализа «5 сил» М. Портера
Table 7. M. Porter's Five Forces analysis

Параметр	Значение	Описание	Направления работ
Угрозы внутриотраслевой конкуренции	Средний	Рынок ООО «ОСК» не относится к высококонкурентным. При этом компания обладает рядом преимуществ перед конкурентами, в том числе за счет своей производственной мощности. За счет этого она имеет возможность выполнять работы оперативно и качественно. Есть ограничения в повышении цен	Проводить постоянный мониторинг предложений конкурентов и завоевывать новые ниши, в том числе вновь появляющиеся. Необходимо повышать воспринимаемую ценность товара и снижать влияние ценовой конкуренции на продажи
Угроза со стороны новых фирм	Средний	Риск появления новых фирм на рынке средний из-за наличия барьеров входа и высокого уровня первоначальных инвестиций вкпе с долгой окупаемостью	Проводить постоянный мониторинг появления новых компаний. Проведение акций, направленных на длительность контакта потребителя с ООО «ОСК»
Угроза со стороны товаров-заменителей	Низкий	Компания обладает рядом неоспоримых преимуществ по сравнению с конкурентами	Поддерживать и совершенствовать качество выполняемых работ
Угроза потери текущих заказчиков	Средний	Риск потери клиентов средний, так как основной заказчик – ПАО «ММК». При этом другие компании не против увеличить долю выполняемых работ в ПАО «ММК»	Увеличить диверсификацию портфеля клиентов. Разработать специальные экономпрограммы для заказчиков, чувствительных к цене. Поддерживать и совершенствовать качество выполняемых работ
Угроза нестабильности поставщиков	Средний	Стабильность со стороны поставщиков. Заинтересованность поставщиков в ООО «ОСК» как в стабильном партнере	Проведение переговоров о снижении цен

Сектор отрасли «Ремонт машин и оборудования» является привлекательной и прибыльной для игроков отрасли, так как, по сути, является вторичной – инфраструктурной, обслуживающей всю отрасль «Машиностроение и металлообработка», а также ряд других отраслей преимущественно промышленного характера. Принудительная изоляция страны от внешнего мира вынуждает переориентироваться на внутренний рынок и нарастить производство тех товаров, которые ранее импортировались. Рост промышленного производства повлечет рост потребности в проектировании, монтаже, обслуживании, наладке и ремонте оборудования. При этом ужесточение экологических норм, государственное лицензирование некоторых услуг, сложность подбора квалифицированных кадров и обеспечение им достойного уровня заработной платы, необходимость наличия значительного первоначального капитала дестимулирует появление новых игроков на рынке.

SWOT-анализ представляет собой универсальный системный комплекс совмещения факторов внутренней и внешней среды компании для выявления её сильных и слабых сторон, а также возможностей и угроз. На **рис. 2** представлена SWOT-матрица результатов анализа.

По результатам проведенного анализа цели компании на ближайшие три года можно сформулировать следующим образом:

- удержать ранее завоеванные позиции на рынке монтажа и ремонта оборудования и по возможности расширить свою долю на рынке;
- завоевать те ниши на рынке, которые планируют появиться в перспективе;
- решить нарастающие кадровые проблемы в организации.

Сформулируем маркетинговые цели деятельности ООО «ОСК» в рамках модели 4С для целостного соответствия ожиданиям потребителей и достижений целей бизнеса (**табл. 8**).

		<i>Внешняя среда</i>	
		Возможности (Opportunities):	Угрозы (Threats):
		<ul style="list-style-type: none"> – высокий износ оборудования заказчиков; – наличие предложения об участии в конкурсах и тендерах на территории РФ; – увеличение рынка сбыта за счет роста востребованности результатов производства отечественных производителей; – появление новых ниш на рынке в силу НТП; – нацеленность государственной экономической политики на поддержание внутреннего рынка; – высокие барьеры входа на рынок для новых конкурентов 	<ul style="list-style-type: none"> – переток персонала к конкурентам или в другие регионы; – активизация существующих конкурентов; – низкая платежеспособность некоторых клиентов; – нестабильность в экономической и политической сферах
<i>Внутренняя среда</i>	<p>Сильные стороны (Strengths):</p> <ul style="list-style-type: none"> – отработанный механизм выполнения работ; – наличие постоянного крупного клиента ПАО «ММК» – налаженные каналы сбыта; – многолетний опыт работы в данной отрасли; – положительный опыт участия в тендерах; – наличие лицензии на ряд востребованных на рынке видов работ; – наличие собственного потенциала для комплексных и системных решений монтажных и ремонтных работ; – высокий уровень квалификации команды; – заинтересованность поставщиков в долгосрочной работе с ООО «ОСК» 	<p>Использование сильных сторон и возможностей для достижения цели:</p> <ul style="list-style-type: none"> – удержание лидирующей позиции в рамках выполнения работ для ПАО «ММК»; – укрепление позиций на существующем рынке вследствие роста его емкости; – проникновение в новые ниши на рынке ремонта и монтажа оборудования 	<p>Использование сильных сторон для избегания угроз:</p> <ul style="list-style-type: none"> – удержание персонала за счет объяснения перспектив развития предприятия; – для ослабления конкуренции поддержание качества выполняемых работ при приемлемом уровне цен; – разработка оптимальных форм расчетов с различными типами клиентов; – усиление диверсификации заказчиков с целью минимизации угроз стабильности компании
	<p>Слабые стороны (Weaknesses):</p> <ul style="list-style-type: none"> – недостаточная активность в рекламной деятельности; – старение кадров – рост среднего возраста наиболее квалифицированного персонала (преимущественно рабочих специальностей); – недостаточная модернизация производственных мощностей 	<p>Использование возможностей для усиления слабых сторон:</p> <ul style="list-style-type: none"> – активизация рекламной компании для привлечения новых клиентов; – привлечение молодых специалистов в отрасль, которая имеет хорошие перспективы роста; – обновление основных фондов за счет роста прибыли при расширении объема выполняемых работ 	<p>Возможность кризиса предприятия из-за угроз среды и слабостей предприятия:</p> <ul style="list-style-type: none"> – уход персонала с предприятия с одновременным дефицитом квалифицированных кадров на рынке приведет к потере качества выполняемых работ и увеличению их длительности; – активизация существующих конкурентов может помешать обновлению производственных мощностей организации; – нестабильная экономическая и политическая обстановка неблагоприятно скажется на состоянии организации, которая будет еще хуже в случае отсутствия продвижения услуг фирмы на рынке

Рис. 2. Матрица SWOT-анализа ООО «ОСК»

Fig. 2. SWOT matrix of LLC USC

Таблица 8. Модель 4С
Table 8. 4C model

Элементы маркетинговой модели 4С [10]	Маркетинговые цели ООО «ОСК»
Потребности клиентов (Customer needs)	– оказывать услуги соответствующего качества, в срок; – предоставлять комплекс услуг по монтажу и ремонту оборудования, чтобы заказчикам не приходилось дополнительно искать исполнителей
Затраты клиента (Cost customer's)	– повышение ценности оказываемой услуги за счет ее оперативности, комплексности, качества
Удобство (Convenience)	– повышение удобства получения информации о продукте за счет оперативности ответов на вопросы клиента, предоставления наиболее актуальной и полной информации об ассортименте услуг ООО «ОСК» на сайте компании
Общение (Communication)	– создание открытого двустороннего диалога с потенциальными клиентами, основанного на их потребностях и желаниях

Заключение

В результате анализа степени влияния факторов дальнего окружения было выявлено, что наибольшее влияние на деятельность ООО «ОСК» оказывают экономические и социальные факторы: сервисная компания производит промежуточный продукт, поэтому сильно зависит от того, насколько успешно обслуживаемые ею компании могут адаптироваться в изменяющейся экономической обстановке. Социальный фактор в первую очередь проявляется в дефиците квалифицированных кадров, следовательно, ООО «ОСК» необходимо разработать стратегию подготовки будущих специалистов, чтобы не испытывать кадровый голод в перспективе.

По итогам анализа «5 сил» М. Портера были выявлены сильные позиции сервисной компании – по ряду позиций выполняемых работ ООО «ОСК» не имеет конкурентов, по множеству позиций обладает сильными преимуществами: стоимостью работ, высоким качеством и сроком выполнения. SWOT-анализ позволил определить, как компания может использовать свои преимущества для удержания лидирующих позиций, завоевания новых ниш, а также дал возможность выделить негативный сценарий развития предприятия в случае формирования неблагоприятной окружающей среды.

По результатам проведенного комплексного маркетингового анализа внешней среды сервисной компании были сформулированы стратегические цели компании: удержание завоеванных позиций, прогнозирование и завоевание новых ниш на рынке отрасли «Машиностроение и металлообработка», сектор «Ремонт машин и оборудования», решение нарастающих кадровых проблем в организации.

Список источников

1. Зиновьева Е.Г., Лимарева Ю.А. Стратегические аспекты маркетинга компании // Тенденции, про-

блемы и перспективы развития региональных кластеров: сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2022. С. 40-46.

2. Тёсов К.С. Модель управления каналами сбыта в кризисный период // Маркетинг в России и за рубежом. 2022. №5. С. 41-49.
3. Комарова С.Н., Мишурова А.Ю. Выбор маркетинговой стратегии сервисного предприятия для обеспечения устойчивого развития // Естественно-гуманитарные исследования. 2020. №28(2). С. 119-128.
4. Амина С. 5 сил Портера (модель). URL: <https://finzz.ru/5-sil-portera-tablica-factory-analiza-ocenka-predpriyatiya.html> (дата обращения: 08.01.2023).
5. Понимание своих потребителей: учеб. пособие. Кн. 1. Жуковский: АНО ВО «Международный институт менеджмента ЛИНК», 2022. 112 с.
6. Создание ценности для потребителей: учеб. пособие: Кн. 3. Жуковский: АНО ВО «Международный институт менеджмента ЛИНК», 2022. 104 с.
7. Классификатор отраслей народного хозяйства (ОКОНХ). URL: <http://fmc.uz/main.php?id=okonh> (дата обращения: 05.01.2023).
8. ООО «Объединенная сервисная компания»: информация о компании. URL: https://zachestnybiznes.ru/company/ul/1077445000302_7445033042_OOO-OSK (дата обращения: 05.01.2023).
9. Логинова Т. Пять сил Портера: анализ конкурентных сил. URL: <https://www.unisender.com/ru/glossary/model-5-konkurentnyh-sil-portera/> (дата обращения: 08.01.2023).
10. Модель 4С. URL: <https://www.marketch.ru/marketing-essentials/model-4c/> (дата обращения: 09.01.2023).

References

1. Zinovyeva E.G., Limareva Yu.A. Strategic aspects of company marketing. *Tendentsii, problemy i perspektivy*

- razvitiya regionalnykh klasterov: sb. nauch. tr. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Trends, problems and prospects of development of regional clusters: collection of scientific papers of the International Scientific and Practical Conference]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2022, pp. 40-46. (In Russ.)
2. Tesov K.S. Model of sales channel management in the crisis period. *Marketing v Rossii i za rubezhom* [Marketing in Russia and Abroad]. 2022;(5):41-49. (In Russ.)
 3. Komarova S.N., Mishurova A.Yu. Choosing a marketing strategy of a service enterprise to ensure sustainable development. *Estestvenno-gumanitarnye issledovaniya* [Studies in Natural Sciences and Humanities]. 2020;(28(2)):119-128. (In Russ.)
 4. Amina S. Porter's 5 forces (model). Available at: <https://finzz.ru/5-sil-portera-tablica-factory-analiza-ocenka-predpriyatiya.html> (Accessed on January 8, 2023).
 5. *Ponimanie svoikh potrebiteley: ucheb. posobie* [Understanding your customers: study guide]. Book 1. Zhukovsky: ANO VO "International Institute of Management LINK", 2022, 112 p. (In Russ.)
 6. Creating value for consumers: Book 3: textbook. stipend. Zhukovsky: Autonomous Non-Profit Organization of Higher Education International Institute of Management LINK, 2022, 104 p. (In Russ.)
 7. Classifier of branches of national economy (OKONKH). Available at: <http://fmc.uz/main.php?id=okonkh> (Accessed on January 5, 2023).
 8. LLC United Service Company: company information. Available at: https://zachestnyibiznes.ru/company/ul/1077445000302_7445033042_OOO-OSK (Accessed on January 5, 2023).
 9. Loginova T. Porter's Five Forces: analysis of competitive forces. Available at: <https://www.unisender.com/ru/glossary/model-5-konkurentnyh-sil-portera/> (Accessed on January 8, 2023).
 10. 4C Model. Available at: <https://www.marketch.ru/marketing-essentials/model-4c/> (Accessed on January 9, 2023).

Поступила 22.05.2023; принята к публикации 29.06.2023; опубликована 28.03.2024
Submitted 22/05/2023; revised 29/06/2023; published 28/03/2024

Кузнецова Маргарита Владимировна – кандидат философских наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: wj27@mail.ru. ORCID 0000-0003-0774-7441

Зиновьева Екатерина Георгиевна – кандидат философских наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: ekaterina_7707@mail.ru. ORCID 0000-0001-7364-4948

Селиванов Артем Сергеевич – заместитель начальника КРМЦ-2 ООО «ОСК», Магнитогорск, Россия.
Email: selivanov.as@usc-service.ru.

Margarita V. Kuznetsova – PhD (Philosophy), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: wj27@mail.ru. ORCID 0000-0003-0774-7441

Ekaterina G. Zinovyeva – PhD (Philosophy), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: ekaterina_7707@mail.ru. ORCID 0000-0001-7364-4948

Artem S. Selivanov – Deputy Head of Sectional Mechanical Repair Shop No. 2 of LLC USC,
Magnitogorsk, Russia. Email: selivanov.as@usc-service.ru.

СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ, ПОДГОТОВКА И ОБУЧЕНИЕ СПЕЦИАЛИСТОВ

DEVELOPMENT STRATEGY, SPECIALIST EDUCATION AND PROFESSIONAL TRAINING

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 796.011.3:622
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-1-185-190



СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ПОДГОТОВКЕ СПЕЦИАЛИСТОВ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НА ОСНОВЕ МЕТОДИК СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ

Дерябин А.В.¹, Фрейнкина И.А.², Андреева О.В.¹, Налимова М.Н.³, Грибовский А.В.¹, Шевцова А.Д.¹

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

² Уральский государственный университет физической культуры, Челябинск, Россия

³ Самарский государственный экономический университет, Самара, Россия

Аннотация. Вопросы сохранения и укрепления здоровья персонала предприятий на сегодняшний день приобрели особую остроту. Особенно это касается технологических структур горно-металлургической отрасли. Поэтому воспроизводство, сохранение и обеспечение трудового долголетия кадров становится приоритетной задачей. Возникла необходимость пересмотреть баланс усилий, направленных на развитие различных сфер жизнедеятельности будущих и действующих специалистов. Цель работы состояла в определении стратегических подходов к подготовке специалистов горно-металлургического комплекса в существующей реальности. Изучение возможностей различных подходов к сохранению и укреплению здоровья и обучающихся, и профессорско-преподавательского состава позволило наметить и частично апробировать на практике методики специализированной двигательной активности, показавшие свою эффективность в подготовке человека, находящегося в экстремальной ситуации. Новизна предложенных решений заключается в системном подходе к формированию компетенций специалистов на основе комплексного применения определенной двигательной активности и для студентов, и для профессорско-преподавательского состава, и для уже действующих специалистов в рамках сохранения высокопроизводительного трудового долголетия. Полученные результаты частичной апробации подтверждают эффективность предложенных подходов к формированию у специалистов качеств, обеспечивающих активную жизненную позицию и помогающих им усваивать профессиональные компетенции. Практическая значимость предлагаемых подходов к разработке системы подготовки специалистов заключается в повышении эффективности и результативности образовательного и воспитательного процесса, позволяющего не только восполнить, сохранить и повысить кадровый потенциал технологических структур горно-металлургической отрасли, но и усилить персонал сферы образования. Специалист с активной жизненной позицией, получивший навыки быстрого усвоения опыта и знаний, реагирования на постоянно меняющиеся условия производства, может эффективно решать поставленные задачи в существующей, практически непрогнозируемой окружающей среде.

Ключевые слова: персонал, здоровье, специализированная двигательная активность, профессиональные компетенции, кадровый потенциал, образовательный процесс

© Дерябин А.В., Фрейнкина И.А., Андреева О.В., Налимова М.Н., Грибовский А.В., Шевцова А.Д., 2024

Для цитирования

Стратегические подходы к подготовке специалистов горно-металлургического комплекса на основе методик специализированной двигательной активности / Дерябин А.В., Фрейнкина И.А., Андреева О.В., Налимова М.Н., Грибовский А.В., Шевцова А.Д. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №1. С. 185-190. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-185-190>



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

STRATEGIC APPROACHES TO TRAINING SPECIALISTS OF THE MINING AND METALLURGICAL COMPLEX BASED ON METHODS OF SPECIALIZED MOTOR ACTIVITY

Deryabin A.V.¹, Freinkina I.A.², Andreeva O.V.¹, Nalimova M.N.³, Gribovsky A.V.¹, Shevtsova A.D.¹

¹ Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

² Ural State University of Physical Education, Chelyabinsk, Russia

³ Samara State University of Economics, Samara, Russia

Abstract. The issues of preserving and strengthening health of enterprise personnel have become particularly acute today. This is especially true for technological structures of the mining and metallurgical industry. Therefore, reproduction, preservation and maintenance of longevity of the workforce become a priority. There was a need to reconsider the balance of effort aimed at developing various spheres of life of future and current specialists. The objective of the research was to identify strategic approaches to the training of specialists of the mining and metallurgical complex in the existing reality. The study on the possibilities of various approaches to preserving and strengthening health of both students and the teaching staff made it possible to outline and partially test in practice methods of specialized motor activity that have shown their efficiency in training a person in an extreme situation. The novelty of the proposed solutions lies in a system approach to developing specialists' competencies based on the integrated application of certain motor activity for students, the teaching staff, and working specialists in the framework of maintaining high-performance work longevity. The obtained results of partial tests confirm efficiency of the proposed approaches to developing the specialists' qualities that ensure an active lifestyle and help them acquire professional competencies. The practical significance of the proposed approaches to developing a system of training specialists is increased efficiency and effectiveness of the educational process, which contributes to not only replenishing, preserving and increasing the personnel potential of technological structures of the mining and metallurgical industry, but also to strengthening the personnel of the education sector. A specialist with an active lifestyle, who has acquired the skills, such as how to gain experience and knowledge quickly, respond to constantly changing production conditions, can efficiently solve the set tasks in the existing almost unpredictable environment.

Keywords: personnel, health, specialized motor activity, professional competencies, human resources, educational process

For citation

Deryabin A.V., Freinkina I.A., Andreeva O.V., Nalimova M.N., Gribovsky A.V., Shevtsova A.D. Strategic Approaches to Training Specialists of the Mining and Metallurgical Complex Based on Methods of Specialized Motor Activity. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 1, pp. 185-190. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-185-190>

Введение

Кадровый дефицит, усиливающийся последнее время, объясняется не только демографической ямой, сформировавшейся в середине 90-х годов прошлого столетия, но и снижением уровня здоровья практически во всех социальных группах населения, в том числе и трудоспособного. Одним из существенных факторов, связанных с ухудшением здоровья, считается недостаточный уровень двигательной активности населения. Наблюдается устойчивая тенденция, протекающая в двух взаимосвязанных областях: снижение уровня двигательной активности на протяжении последних десятилетий и повышение обращаемости в медицинские учреждения наряду с увеличением потерь от временной нетрудоспособности по болезни. Кроме прямых издержек, связанных со снижением фонда рабочего времени, существенное значение приобретают факторы сохранения социальной

лояльности персонала и предотвращения репутационных потерь [4]. И хотя последние факторы имеют косвенное влияние на результаты хозяйственной деятельности предприятий, они обладают пролонгированным действием и накопительным эффектом. Нейтрализация негативного эффекта от воздействия этих факторов представляет из себя долгий и сложный процесс, который легче предупредить, чем исправлять последствия.

Темпы подготовки кадров не успевают за темпами выбытия персонала, особенно высококвалифицированного, требующего времени не только на теоретическую подготовку, но и на получение специфического практического опыта на рабочем месте. Снижение уровня двигательной активности достигло отметки, соответствующей началу процессов деградации физической составляющей человеческого организма, и отразилось на его психоэмоциональной сфере. Психология «таблетки», когда ведётся беспорядочный

образ жизни с нарушением всех возможных внутренних функциональных балансов (режим питания, время сна и бодрствования, физических и интеллектуальных нагрузок, продолжительности работы и отдыха и др.) и для поддержания себя в тонусе достаточно съесть таблетку, уже не работает. Для восстановления работоспособности и поддержания ее на требуемом уровне необходимо перестроить своё отношение к соблюдению естественных, присущих человеческому организму и сформировавшихся за сотни поколений функциональных балансов [1, 5-8].

Материалы и методы исследования

Подготовка специалистов для горно-металлургического комплекса, работа в котором требует наличия особого уровня функционирования как физической, так и психоэмоциональной составляющей, связанной с влиянием различных вредных производственных факторов и использованием сложных технологических операций, должна включать в себя формирование компетенций сохранения и укрепления и своего потенциала здоровья, и вверенного коллектива [2, 3]. Без формирования навыков поддержания достаточной двигательной активности выполнить эти требования сегодняшнего дня проблематично и затратно [11-14].

Сегодняшнее состояние образовательной сферы, когда существенно нарушено равновесие в распределении времени в формировании навыков двигательной активности и профессиональных компетенций в пользу последних, не позволяет решить эти задачи. Необходимо не только пересмотреть соотношение во времени, отведенном на формирование профессиональных компетенций и навыков двигательной активности, но и использовать в подготовке специалистов определенные специализированные методики двигательной активности [2, 9, 10].

Изучение возможностей различных подходов к сохранению и укреплению здоровья и обучающихся, и профессорско-преподавательского состава позволило наметить и частично апробировать на практике методики специализированной двигательной активности, показавшие свою эффективность в подготовке человека, находящегося в экстремальной ситуации [15]. Формирование компетенций специалистов предлагается проводить на основе комплексного применения специализированной двигательной активности, основанной на триедином одновременном воздействии на физическую, интеллектуальную и психоэмоциональную сферу жизнедеятельности и для студентов, и для профессорско-преподавательского состава, и для уже действующих специалистов [9, 10]. Такой подход нашёл широкое распространение и реализацию в традициях восточных единоборств, когда обучающегося погружают в специально смоделированную экстремальную ситуацию, требующую максимального задействования внутренних резервов. При этом происходит рост адаптационных возможностей и гармоническое усиление когнитивных функ-

ций во всех трех основных сферах жизнедеятельности участника тренировочного процесса.

С 2022 года было запущено несколько пилотных групп, практикующих специализированную двигательную активность на основе каратэ-до сетокан, дыхательных практик цигун и работы со специальными предметами. Занятия проводились с: профессорско-преподавательским составом Института гуманитарного образования; студентами Института горного дела в рамках подготовки специалистов и руководителей высокого уровня для горной отрасли; активом студентов и сотрудников Научно-исследовательского центра физической и медицинской реабилитации детей и взрослых и разновозрастными работниками промышленных предприятий города. Таким образом, пилотными группами были охвачены представители всех участников процесса подготовки специалистов как на стадии формирования новых кадров, так и на стадии поддержания компетенций уже действующего персонала. Общее количество участников пилотных групп составило более 50 человек. Перед началом занятий и во время тренировочного процесса была проведена диагностическая оценка функционального состояния физической и психоэмоциональной сферы занимающихся. Оценка функционального и психоэмоционального состояния организма включает следующие процедуры: определение антропометрических данных: рост, масса тела, окружность груди (вдох, выдох), длина конечностей и др.; определение функциональных данных: спирография, жизненный объем легких (ЖЕЛ) и сравнение с должным жизненным объемом легких (ДЖЕЛ), оценка силовых качеств, нагрузочные тесты, пульсометрия, артериальное давление, электрокардиография (ЭКГ), велоэргометрия, ультразвуковые исследования (УЗИ), лабораторные исследования крови и мочи и др.; определение характеристик психоэмоционального состояния: компьютерные и практические психотесты, вариабельность ритма, реоэнцефалография (РЕГ) и электроэнцефалография (ЭЭГ) [10].

Полученные результаты и их обсуждение

Практически все участники пилотных групп отметили повышение в результате занятий жизненного тонуса, настроения, работоспособности, способности к освоению нового материала и навыков, улучшение самочувствия и самооценки. Педагоги обозначили снижение негативных эффектов от психоэмоционального выгорания, повышение времени производительной занятости и творческого состояния. У студентов было отмечено повышение общей и качественной успеваемости, творческой инициативы и расширение конструктивного целеполагания. У действующих специалистов, особенно из категории руководителей, было зафиксировано повышение психологической устойчивости при общении внутри рабочего коллектива, снижение физической и эмоциональной усталости. В целом наблюдалось повы-

шение характеристик физического и психоэмоционального статуса всех занимающихся в среднем от 15 до 35%, в зависимости от начального состояния и индивидуальных особенностей участника тренировочного процесса.

Полученные предварительные результаты реализации пилотных проектов, связанных с повышением уровня физической и психоэмоциональной функциональности участников образовательной сферы, на основе применения методик специализированной двигательной активности показали эффективность предложенного подхода к организации качественной подготовки специалистов для горно-металлургического комплекса. Формирование определенных навыков и компетенций на основе повышения уровня и качества двигательной активности позволяет решать вопросы сохранения и укрепления здоровья персонала предприятий и обеспечения трудового долголетия кадров. Практическая значимость предлагаемых подходов к формированию системы подготовки специалистов заключается в повышении эффективности и результативности образовательного и воспитательного процесса, позволяющего не только восполнить, сохранить и повысить кадровый потенциал предприятий горно-металлургического комплекса, но и усилить персонал сферы образования, тем самым обеспечить возможности воспроизводства высококвалифицированного персонала в условиях ограниченности ресурсов и непредсказуемости протекающих социально-экономических процессов. Специалист с активной жизненной позицией, получивший навыки быстрого усвоения опыта и знаний, реагирования на постоянно меняющиеся условия производства, может эффективно решать поставленные задачи в существующей, практически не прогнозируемой окружающей среде.

Заключение

Таким образом, впервые предложен системный стратегический подход к формированию компетенций и навыков специалистов на основе комплексного применения специализированной двигательной активности в традициях восточных единоборств и для студентов, и для профессорско-преподавательского состава, и для уже работающего персонала с целью восстановления и поддержания высокопроизводительного трудового долголетия.

Список источников

1. Замбжицкая Е.С., Гумерова Э.Д. «Дерево» решений как инструмент принятия управленческих решений в отношении развития кадрового потенциала промышленных предприятий // Приложение математики в экономических и технических исследованиях. 2020. №1(10). С. 121-126.
2. Комплексная стратегия повышения качества трудовых ресурсов в черной металлургии / В.Н. Немцев, А.В. Дерябин, Т.П. Рахлис, Н.В. Скворцова // Ме-

таллург. 2022. №2. С. 4-14.

3. Криворучко В.И., Дерябин А.В., Котляр Н.Н. Стратегические подходы к обеспечению кадровой безопасности в образовательной сфере // Экономика и предпринимательство. 2021. №12 (137). С. 1122-1124.
4. Оценка экономических потерь высокотехнологичного предприятия от временной нетрудоспособности персонала / Дерябин А.В., Шестопапов Е.В. // Управление персоналом: реалии настоящего и возможности будущего: материалы II Междунар. науч.-практ. конф., 23 марта 2023 г., г. Донецк. Донецк: ДонНТУ, 2023. С. 248-252.
5. Замбжицкая Е. С., Гумерова Э.Д. Анализ эффективности использования кадрового (трудового) потенциала предприятия при помощи симплекс-метода // Приложение математики в экономических и технических исследованиях. 2020. № 1(10). С. 36-43.
6. Павлухина М.В., Иванова Н.Е., Замбжицкая Е.С. Кадровый потенциал в системе управления современным промышленным предприятием. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2020. 63 с.
7. Замбжицкая Е.С., Харченко А.А. Человеческий капитал как структурный элемент гудвилла // Корпоративная экономика. 2015. №1(1). С. 37-42.
8. Замбжицкая Е.С., Харченко А.А. Сравнительный анализ существующих подходов к понятию «человеческий капитал» // Экономика и политика. 2015. №1(4). С. 37-40.
9. Обоснование необходимости применения профессионально-прикладной физической культуры в подготовке специалистов горного дела / О.В. Андреева, И.А. Пыталев, Е.В. Шестопапов, В.В. Якшина // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №1. С. 134-141.
10. Методики специализированной двигательной активности в комплексной программе сохранения и укрепления здоровья преподавателей и студентов / Андреева О.В., Дерябин А.В., Пыталев И.А., Жарова К.Е. // Современные проблемы и перспективы развития физической культуры и спорта: материалы Всероссийской научно-практической конференции, декабрь 2023 г., Магнитогорск. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2023. С. 94-100.
11. Толмачев О.М. Сущность экономических категорий «трудоустройство» и «занятость», их взаимосвязь с трудовыми ресурсами // Экономика и социум: современные модели развития. 2018. Т. 8. №3. С. 14-23.
12. Круглов Д.В. Влияние digital-технологий на качество человеческих ресурсов // Экономика труда. 2018. Т. 5. №4. С. 951-958.
13. Былков В.Г. Концептуальные основы теории развития трудового потенциала // Известия Иркут-

ской государственной экономической академии. 2012. № 3 (83). С. 74-79.

14. Костенькова Т.А., Трубицына Н.С. Управление кадровым потенциалом промышленного комплекса региона в условиях инновационного развития // Лидерство и менеджмент. 2019. Т. 6. №4. С. 469-478.
15. Литвинов С.А. Теория и методика каратэ. 2-е изд., испр. и доп. М.: Издательство Юрайт, 2018. 183 с.

References

1. Zambrzhitskaya E.S., Gumerova E.D. "Decision tree" as a tool for making managerial decisions regarding the development of the human resources potential of industrial enterprises. *Prilozhenie matematiki v ekonomicheskikh i tekhnicheskikh issledovaniyakh* [Application of Mathematics in Economic and Technical Research]. 2020;(1(10)):121-126. (In Russ.)
2. Nemtsev V.N., Deryabin A.V., Rakhlis T.P., Skvortsova N.V. A comprehensive strategy for improving the quality of labor resources in ferrous metallurgy. *Metallurg* [Metallurgist]. 2022;(2):4-14. (In Russ.)
3. Krivoruchko V.I., Deryabin A.V., Kotlyar N.N. Strategic approaches to ensuring personnel security in the educational sphere. *Ekonomika i predprinimatelstvo* [Economics and Entrepreneurship]. 2021;(12(137)):1122-1124. (In Russ.)
4. Deryabin A.V., Shestopalov E.V. Assessment of economic losses of a high-tech enterprise from temporary disability of personnel. *Upravlenie personalom: realii nastoyashchego i vozmozhnosti budushchego: materialy II Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Personnel Management: Realities of the Present and Opportunities of the Future: Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference]. Donetsk: Donetsk National Technical University, 2023, pp. 248-252. (In Russ.)
5. Zambrzhitskaya E.S., Gumerova E.D. Analysis of efficiency of using the personnel (labor) potential of an enterprise using the simplex method. *Prilozhenie matematiki v ekonomicheskikh i tekhnicheskikh issledovaniyakh* [Application of Mathematics in Economic and Technical Research]. 2020;(1(10)):36-43. (In Russ.)
6. Pavluchina M.V., Ivanova N.E., Zambrzhitskaya E.S. *Kadrovyye potentsial v sisteme upravleniya sovremennym promyshlennym predpriyatiem* [Personnel potential in the modern industrial enterprise management system]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2020, 63 p. (In Russ.)
7. Zambrzhitskaya E.S., Kharchenko A.A. Human capital as a structural element of goodwill. *Korporativnaya ekonomika* [Corporate Economics]. 2015;(1(1)): 37-42. (In Russ.)
8. Zambrzhitskaya E.S., Kharchenko A.A. A comparative analysis of existing approaches to the concept of "human capital". *Ekonomika i politika* [Economics and Politics]. 2015;(1(4)):37-40. (In Russ.)
9. Andreeva O.V., Pytalev I.A., Shestopalov E.V., Yakshina V.V. Providing a rationale for a need for occupation-specific applied physical education in training of mining specialists. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023;21(1):134-141. (In Russ.)
10. Andreeva O.V., Deryabin A.V., Pytalev I.A., Zharova K.E. Methods of specialized motor activity in a comprehensive program for the preservation and strengthening of health of university teachers and students. *Sovremennye problemy i perspektivy razvitiya fizicheskoy kultury i sporta: materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Current Issues and Prospects for Development of Physical Education and Sport: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference]. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2023, pp. 94-100. (In Russ.)
11. Tolmachev O.M. The essence of the economic categories of "labor potential" and "employment", their relationship with labor resources. *Ekonomika i sotsium: sovremennye modeli razvitiya* [Economics and Society: Contemporary Models of Development]. 2018;8(3):14-23. (In Russ.)
12. Kruglov D.V. The impact of digital technologies on the quality of human resources. *Ekonomika truda* [Russian Journal of Labor Economics]. 2018;5(4): 951-958. (In Russ.)
13. Bylkov V.G. A conceptual framework of the theory of labor potential development. *Izvestiya Irkutskoy gosudarstvennoy ekonomicheskoy akademii* [Bulletin of Irkutsk State Academy of Economics]. 2012;(3(83)):74-79. (In Russ.)
14. Kostenkova T.A., Trubitsyna N.S. Human resource management of the industrial complex of the region in the context of innovative development. *Liderstvo i menedzhment* [Leadership and Management]. 2019;6(4):469-478. (In Russ.)
15. Litvinov S.A. *Teoriya i metodika karate* [Theory and methodology of karate]. Moscow: Yurait Publishing House, 2018, 183 p. (In Russ.)

Поступила 06.01.2024; принята к публикации 05.02.2024; опубликована 28.03.2024
Submitted 06/01/2024; revised 05/02/2024; published 28/03/2024

Дерябин Андрей Владимирович – кандидат экономических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: a-deryabin@mail.ru ORCID 0000-0002-6085-7001

Фрейнкина Ирина Александровна – кандидат педагогических наук, доцент,
Уральский государственный университет физической культуры, Челябинск, Россия.
Email: freinkina@mail.ru. ORCID 0000-0003-3606-3321

Андреева Ольга Викторовна – кандидат педагогических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: olgaandreeva240563@mail.ru. ORCID 0000-0003-3227-6223

Налимова Марина Николаевна – старший преподаватель,
Самарский государственный экономический университет, Самара, Россия.
Email: pmn-marina@yandex.ru. ORCID 0009-0002-9626-7596

Грибовский Алексей Викторович – специалист по физической реабилитации,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: jksmag@gmail.com. ORCID 0009-0001-1497-8478

Шевцова Ангелина Дмитриевна – студент, Магнитогорский государственный технический
университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: gelya.shevtsova18@mail.ru. ORCID 0009-0001-3978-3984

Andrey V. Deryabin – PhD (Econ.), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: a-deryabin@mail.ru. ORCID 0000-0002-6085-7001

Irina A. Freinkina – PhD (Pedagogy), Associate Professor,
Ural State University of Physical Education, Chelyabinsk, Russia.
Email: freinkina@mail.ru. ORCID 0000-0003-3606-3321

Olga V. Andreeva – PhD (Pedagogy), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: olgaandreeva240563@mail.ru. ORCID 0000-0003-3227-6223

Marina N. Nalimova – Senior Lecturer, Samara State University of Economics, Samara, Russia.
Email: pmn-marina@yandex.ru ORCID 0009-0002-9626-7596

Aleksey V. Gribovsky – Physical Rehabilitation Specialist,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: jksmag@gmail.com. ORCID 0009-0001-1497-8478

Angelina D. Shevtsova – student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: gelya.shevtsova18@mail.ru. ORCID 0009-0001-3978-3984