

ВЕСТНИК

Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова

2023. Т.21, №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. Колокольников (Россия)

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

РЕДАКЦИЯ

Главный редактор О.Н. Тулупов

Первый заместитель главного редактора
М.А. Полякова

Заместители главного редактора:

А.Г. Корчунов, О.С. Логунова,
Н.Н. Орехова, В.Р. Храмшин

Редактор Н.П. Боярова

Технический редактор А.А. Нерода

Перевод на английский О.Е. Сухих

Дизайн обложки: А.Д. Григорьев

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

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

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

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

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

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

Учредитель – Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова.

(455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, д. 38).

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

Адрес редакции:

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

Адрес издателя:

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

Адрес типографии:

455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», участок оперативной полиграфии
Выход в свет 27.03.2023. Заказ 84. Тираж 500 экз. Цена свободная.

VESTNIK

of Nosov Magnitogorsk State Technical University

2023. Vol.21, 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)

M. Dabala' (Italy), R.O. Dusane (India),
H. Dyja (Poland), Ye Feng (China),
S.E. Gavrishev (Russia), V.E. Gromov (Russia),
J. Grum (Slovenia), I.G. Gun (Russia),
V.N. Kalmykov (Russia), D.R. Kaplunov (Russia),
R. Kawalla (Germany), V.R. Khramshin (Russia),
A.G. Korchunov (Russia), O.S. Logunova (Russia),
D. Milovanovic (Serbia), K. Mori (Japan),
I. Musirin (Malaysia), A.B. Naizabekov (Kazakhstan),
N.N. Orekhova, M. Pietrzyk (Poland), R. Qin (UK),
V.F. Rashnikov (Russia), G.A. Rogerson (UK),
V.M. Schastlivtsev (Russia), O.N. Tulupov (Russia),
J.-B. Vogt (France)

EDITORIAL STAFF

Editor-in-Chief O.N. Tulupov

First Deputy Chief Editor M.A. Polyakova

Deputy Chief Editors:

A.G. Korchunov, O.S. Logunova,
V.R. Khramshin, N.N. Orekhova

Editor N.P. Boyarova

Technical Editor A.A. Neroda

Translated into English O.E. Sukhikh

The cover is designed by A.D. Grigorev

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

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

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

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

Editorial office:

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

Publisher office:

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

Printing office:

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

Publication date: 27.03.2023. Order 84. Circulation: 500. Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ 5

Доможиров Д.В.

К вопросу повышения эффективности добычи и переработки минерального сырья за счет управления параметрами буровзрывных работ для достижения требований к качеству 5

Логинов Е.В., Масальский С.С.

Исследование технических характеристик серийно выпускаемых моделей выемочно-погрузочного оборудования разных типов 15

Чебан А.Ю., Секисов А.Г.

Комбинированная технология разработки сложноструктурных глубокозалегающих россыпей золота 24

ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ 32

Серебрякова А.А., Загуляев Д.В., Шляров В.В., Шлярова Ю.А., Иванов Ю.Ф., Устинов А.М.

Исследование механических характеристик и морфологии поверхности разрушения сплава АК5М2, поверхностно модифицированного титаном 32

Гузев В.И., Сергеев С.В., Нуркенов А.Х., Батуев В.В., Сергеев Ю.С., Нестерук Е.В.

Исследование колебаний технологической системы роботизированного комплекса для реализации методики проектирования операции механической обработки вращающимися инструментами 45

Сызранцев В.Н., Стариков А.И.

Геометрия резцовой головки для модификации профиля арочных зубьев цилиндрических колес 55

СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ 65

Дранкова Н.А., Денисова Я.В.

Проблемы эффективности системы менеджмента качества и пути их решения в условиях новой экономической среды 65

Прыткова Е.А., Давыдов В.М.

Анализ применения иерархических нейросетевых методов в контроле качества 74

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ 82

Ерошенко В.О., Малькова М.Ю., Задиранов А.Н., Мецхеряков А.В.

Разработка модели для печати лопаток турбин на 3D-принтере 82

Константинов Д.В., Матвеев С.В., Песин А.М., Корчунов А.Г., Пивоварова К.Г.

Применение самозаклинивающихся структур: демонстрация концепции на основе КЭ-моделирования 93

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ 100

Спиридонов Е.К., Исмагилов А.Р., Хабарова Д.Ф.

Исследование и разработка пневматического запорного устройства эжекционного типа для предотвращения выхлопа агрессивных газов 100

CONTENTS

MINING 5

Domozhirev D.V.

On the Issue of Increasing Efficiency of Mining and Processing of Mineral Raw Materials by Controlling the Parameters of Drilling and Blasting Operations to Achieve Quality Requirements 5

Loginov E.V., Masalskiy S.S.

Research on Technical Characteristics of Mass-Produced Models of Extraction and Loading Equipment of Various Types 15

Cheban A.Yu., Sekisov A.G.

Combined Technology for the Development of Complex Structure Deep Gold Placers 24

MATERIAL PROCESS ENGINEERING 32

Serebryakova A.A., Zaguliaev D.V., Shlyarov V.V., Shliarova Yu.A., Ivanov Yu.F., Ustinov A.M.

Study on Mechanical Characteristics and Fracture Surface Morphology of the Ti Surface-Modified AK5M2 Alloy 32

Guzeev V.I., Sergeev S.V., Nurkenov A.Kh., Batuev V.V., Sergeev Yu.S., Nesteruk E.V.

Study on Oscillations of the Technological System of a Robotic Complex to Implement the Technique of Designing Rotary Machining Operations 45

Syzrantsev V.N., Starikov A.I.

Cutter Head Geometry to Modify the Cylindrical Wheel Arc Teeth Profile 55

STANDARDIZATION, CERTIFICATION AND QUALITY MANAGEMENT 65

Drankova N.A., Denisova Ya.V.

Problems of Efficiency of the Quality Management System and Ways to Solve Them in the New Economic Environment 65

Prytkova E.A., Davydov V.M.

Analysis of the Use of Hierarchical Neural Network Methods in Quality Control 74

MODELLING OF METALLURGICAL PROCESSES 82

Eroshenko V.O., Malkova M.Yu., Zadiranov A.N., Meshcheryakov A.V.

Development of a Model for 3D Printing of Turbine Blades 82

Konstantinov D.V., Matveev S.V., Pesin A.M., Korchunov A.G., Pivovarov K.G.

Application of Interlocking Structures: FEM-Based Concept Demonstration 93

NEW TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT 100

Spiridonov E.K., Ismagilov A.R., Khabarova D.F.

Research and Development of a Pneumatic Shut-Off Device of an Ejection Type to Prevent the Exhaust of Hazardous Gases 100

**ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ
И РЫНОК ПРОДУКЦИИ..... 109**

Жилина В.А.

Социотехническая системность и универсальность
современной инженерии: Homo Technology 109

Пономарева О.С., Майорова Т.В., Приймак В.А.

Разработка и внедрение системы КРІ
на предприятиях металлургической отрасли 118

Назаревич С.А.

Показатели инновационного поведения
для мониторинга состояния готовности
организационной системы к проведению
изменений..... 126

**СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ, ПОДГОТОВКА
И ОБУЧЕНИЕ СПЕЦИАЛИСТОВ..... 134**

Андреева О.В., Пыталев И.А.,

Шестопалов Е.В., Якишина В.В.

Обоснование необходимости применения
профессионально-прикладной физической
культуры в подготовке специалистов
горного дела 134

**ECONOMICS, MANAGEMENT
AND PRODUCT MARKET..... 109**

Zhilina V.A.

Sociotechnical Consistency and Universality
of Modern Engineering: Homo Technology..... 109

Ponomareva O.S., Maiorova T.V., Priymak V.A.

Development and Implementation of the KPI
System at Metallurgical Enterprises 118

Nazarevich S.A.

Indicators of Innovative
Behavior Used to Monitor Readiness
of the Organizational System
for Changes..... 126

**DEVELOPMENT STRATEGY, SPECIALIST
EDUCATION AND PROFESSIONAL TRAINING.... 134**

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 134

РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

MINING

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

УДК 622.235:622.732.2

DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-1-5-14



К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОБЫЧИ И ПЕРЕРАБОТКИ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ ЗА СЧЕТ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ ТРЕБОВАНИЙ К КАЧЕСТВУ

Доможиров Д.В.

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

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). В статье предлагается концепция селективной подготовки минерального сырья путем управления параметрами буровзрывных работ с учетом требований к качеству на стадиях добычи и переработки. Требования к качеству подготовки к выемке рассматриваются с трех основных позиций: с точки зрения геометрии приемных отверстий, требований к качеству минерального сырья и видам товарной продукции и обеспечения безопасности ведения взрывных работ. Определены параметры буровзрывных работ на основе цикличности преобразования продуктов дезинтеграции в процессах подготовки минерального сырья при добыче и переработке. В работе под *дезинтеграцией* понимается селективное разрушение (разупрочнение) массива (структурной отдельности) на отдельные частицы (фрагменты) или куски с сформированными контрастными структурными элементами раскрытия и разделения. **Цель работы.** Обоснование параметров буровзрывных работ для дезинтеграции минерального сырья с соблюдением принципа избирательного формирования контрастного структурного элемента раскрытия и разделения для каждого процесса подготовки открытой геотехнологии и обогатительного передела. **Используемые методы.** Использован комплексный подход, который позволил достичь поставленной цели. Комплексный подход в рамках исследования включает методы научного анализа опубликованных ранее отечественных и зарубежных исследований, анализ аналитических и эмпирических зависимостей на предмет сопоставления с результатами практических исследований. **Результат.** Предлагаемая концепция селективной подготовки позволяет повысить эффективность добычи и переработки минерального сырья за счет управления параметрами буровзрывных работ.

Ключевые слова: минеральное сырье, подготовка, буровзрывные работы, дезинтеграция, текстура, структура, добыча, переработка, показатели качества

© Доможиров Д.В., 2023

Для цитирования

Доможиров Д.В. К вопросу повышения эффективности добычи и переработки минерального сырья за счет управления параметрами буровзрывных работ для достижения требований к качеству // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №1. С. 5-14. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-5-14>



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

ON THE ISSUE OF INCREASING EFFICIENCY OF MINING AND PROCESSING OF MINERAL RAW MATERIALS BY CONTROLLING THE PARAMETERS OF DRILLING AND BLASTING OPERATIONS TO ACHIEVE QUALITY REQUIREMENTS

Domozhnikov D.V.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The article proposes the concept of a selective preparation of mineral raw materials by controlling the parameters of drilling and blasting operations, taking into account the quality requirements at the stages of extraction and processing. The requirements for the quality of the preparation for excavation are considered from three main positions: geometry of receiving openings, requirements for the quality of mineral raw materials and types of commercial products, and safety of blasting operations. The parameters of drilling and blasting operations are determined based on the cyclic transformation of disintegration products in the processes of preparation of mineral raw materials during extraction and processing. Disintegration is understood in this research as the selective destruction (softening) of an array (structural parting) into individual particles (fragments) or lumps with formed contrasting structural elements of exposure and separation. **Objectives.** The article is aimed at providing a rationale for the parameters of drilling and blasting operations used to disintegrate mineral raw materials in compliance with the principle of the selective formation of a contrasting structural element of exposure and separation for every process of the preparation of open geotechnology and the dressing stage. **Methods Applied.** An integrated approach was used to achieve this objective. Such integrated approach within the framework of the study includes methods of scientific analysis of published Russian and foreign studies, analysis of analytical and empirical dependencies for comparison with the results of practical research. **Result.** The proposed concept of the selective preparation contributes to increasing efficiency of extraction and processing of mineral raw materials by controlling the parameters of drilling and blasting operations.

Keywords: mineral raw materials, preparation, drilling and blasting operations, disintegration, texture, structure, extraction, processing, quality parameters

For citation

Domozhnikov D.V. On the Issue of Increasing Efficiency of Mining and Processing of Mineral Raw Materials by Controlling the Parameters of Drilling and Blasting Operations to Achieve Quality Requirements. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 1, pp. 5-14. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-5-14>

Введение

В современных условиях показатели качества процесса подготовки горных пород к выемке (выход негабарита, средний размер куска) определяются лишь геометризацией приемных емкостей горнотранспортного оборудования и приемных отверстий перерабатывающих комплексов. Подготовка минерального сырья на стадии переработки (дробление, разупрочнение и дезинтеграция) является наиболее энергоемким процессом и имеет низкие показателями полноты и комплексности освоения запасов. Это связано с недостаточностью проработки вопроса селективного разрушения (дезинтеграции) при подготовке минерального сырья на стадии добычи. Так, текстура (структура) полезного ископаемого, форма полезных компонентов, свойства минералов оказывают важное влияние на эффективность раскрытия поверхности минералов и всего обогатительного предела. Таким образом,

при организации комплексной переработки минерального и техногенного сырья с точки зрения рациональной подготовки полезного ископаемого не соблюдается традиционный подход технологов-обогащателей «не дробить и не обогащать ничего лишнего», что является следствием повышенной энергоемкости и неэффективного процесса подготовки для дальнейшего обогащения [1, 2]. Поэтому актуальным является необходимость применения на начальных стадиях добычи и переработки селективной подготовки минерального сырья.

В последнее десятилетие в теории и практике взрывного дела активно используется термин «дезинтеграция». В рамках данной научно-исследовательской работы под *дезинтеграцией* понимается селективное разрушение (разупрочнение) массива (структурной отдельности) на отдельные частицы (фрагменты) или куски с сформированными контрастными структурными элементами раскрытия и разделения.

Подготовка минерального сырья в современных условиях – это процесс, обеспечивающий селективную дезинтеграцию за счет формирования фрагментов (кусков) с контрастными структурными элементами раскрытия и разделения при добыче и переработке. То есть селективная дезинтеграция – это группирование структурных элементов разделения для следующего этапа дезинтеграции с учетом соответствующей техники (механизмов) и технологии. Такое последовательное группирование структурных элементов раскрытия и разделения на всех этапах подготовки при открытой геотехнологии и обогачительно-перехлада позволяет комплексно осваивать минеральное сырье за счет расширения спектра готовой продукции горного производства. Получаем, что для разной товарной продукции соответствующий состав и размеры структурных элементов. То есть определение параметров буровзрывных работ (БВР) в современных условиях предполагает цикличность преобразования продуктов дезинтеграции в процессах подготовки минерального сырья при добыче и переработке (рис. 1).

Так, уровень иерархии I – это подготовка минерального сырья к выемке с помощью БВР (первый технологический процесс открытой геотехнологии), где формирование структурных элементов начинается с физико-механических свойств горной массы и текстурно-структурных характеристик массива и заканчивается с усреднением в группы по разрушаемому объему.

При увеличении числа товарных групп при дезинтеграции на стадиях добычи и переработки возрастает роль текстурно-структурных характеристик минерального сырья и отдельных минералов за счет уменьшения размеров отдельных фрагментов, что ведет к необходимости обоснования техники (механизмов) и режимов технологии дробления на всех этапах разрушения. Получаем, что подготовка при добыче и переработке минерального сырья – это цикличность последовательных преобразований контрастных структурных элементов раскрытия (массив со своей текстурой и структурой) в структурные элементы разделения (раздробленные куски, отдельные фрагменты), и далее структурные элементы разделения – это контрастные структурные элементы раскрытия следующего цикла и т. д. до всех видов товарной продукции (предконцентрационные продукты).

Таким образом, при сложной структуре минерального сырья и неравномерности физико-механических свойств подготовку полезного ископаемого к переработке следует начинать с начальной стадии дезинтеграции, то есть с процесса подготовки горной породы к выемке с помощью БВР.

В предлагаемой концепции качественная подготовка к выемке с помощью селективного разрушения (дезинтеграции) массива является основным направлением повышения эффективности добычи и переработки минерального сырья.

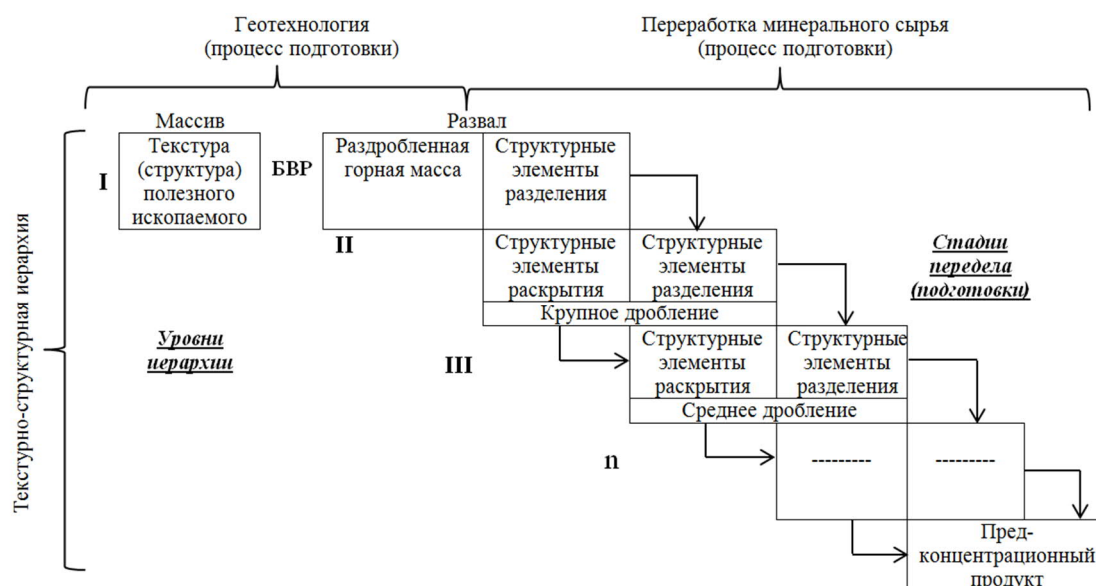


Рис. 1. Цикличность преобразования продуктов селективного разрушения (дезинтеграции) и иерархия в процессах подготовки минерального сырья при добыче и переработке

Fig. 1. Cyclic transformation of products of the selective destruction (disintegration) and hierarchy in the processes of preparation of mineral raw materials during extraction and processing

Методология исследования

В современных условиях буровзрывная подготовка пород к выемке при открытой геотехнологии является основным способом подготовки скальных и полускальных горных пород к выемке. Данный способ объемного высокоэнергетического воздействия на массив горной породы способствует возникновению и развитию макро- и микроразрушений до отдельных от долей метра до долей миллиметра на всех текстурно-структурных уровнях иерархии. Энергоемкость взрывной подготовки в несколько раз ниже энергоемкости процессов дробления при переработке, несмотря на значительную разницу в стоимости электроэнергии и энергии химического превращения взрывчатых веществ [3, 4]. Получаем, что селективное разрушающее воздействие на стадии взрывной подготовки является актуальной задачей для оптимизации суммарных энергозатрат процессов подготовки и переработки минерального сырья.

Оптимизацией параметров БВР для достижения качественных показателей добычи минераль-

ного сырья и снижения энергоемкости процесса переработки занимались многие ученые XX и XXI веков [5-8]. Однако в данных исследования не в полной мере рассмотрена концепция комплексного освоения недр, где в основе заложены технологические принципы в совокупности с технико-экономическими моделями. При этом доказано, что БВР являются самым объемным и высокоэнергетическим воздействием на горный массив процесса подготовки к выемке, который способен снижать суммарную энергоемкость на всех последующих процессах дезинтеграции.

Предлагаемая концепция селективной подготовки минерального сырья при открытой геотехнологии с помощью БВР ставит задачу не только отделения от массива, выполнение геометрических условий, но и селективное разрушение (дезинтеграция) скального и полускального массива на заданные отдельные куски (грансостав определенных фракций) согласно текстурному (структурному) строению и требованиям к качеству (табл. 1).

Таблица 1. Корреляция показателей качества минерального сырья в процессах подготовки при добыче и переработке

Table 1. Correlation between the quality parameters of mineral raw materials in the preparation processes during extraction and processing

Показатели качества минерального сырья процесса подготовки к выемке (добыча)		Показатели качества минерального сырья на стадиях дробления и измельчения (переработка)				
		Рудные полезные ископаемые		Нерудные полезные ископаемые		
Ограничивающие условия	Показатели	Ограничивающие условия	Показатели	Ограничивающие условия	Показатели	Месторождения
<u>Геометрические условия</u> (геометризация приемных емкостей горно-транспортного оборудования и отверстий перерабатывающих комплексов)	– кондиционный размер куска	– Структура (текстура) полезного ископаемого	– содержание полезного компонента	Кондиции, товарная продукция (сортность)	– зольность	Угольные
	– средний размер куска		– содержание вредных примесей		– лекадность	Строительного камня (щебень)
	– выход негабарита		– степень дробления		– белизна	Белого мрамора
	– переизмельчение		– переизмельчение		– вредные (кварцевые) включения	Кровельных сланцев
	– степень дробления		– гранулометрический состав		– глинизация	Известняковые
	– гранулометрический состав		– потери		– степень дробления	Для всех типов месторождения
<u>Качественные условия</u> (отработка контактных зон сложно-структурных месторождений)	– потери	– Структурные элементы раскрытия и разделения	– разубоживание		– переизмельчение	
	– разубоживание		– выход продукта		– гранулометрический состав	
	– текстурно-структурные (трещиноватость, зоны качественных характеристик полезного ископаемого, зоны вмещающих пород и вредных включений)		– извлечение полезного компонента		– потери	
					– разубоживание	

Примечание. Области корреляции показателей качества минерального сырья в процессах подготовки при добыче и переработке:

- геометрические условия (в большей степени для ОГР, чем для ОПИ);
- геометрические условия (в большей степени для ОПИ, чем для ОГР);
- качественные условия (технологические);
- качественные условия (текстурно-структурные).

Идея исследования основывается на том, что текстурно-структурное строение горных пород связано с распределением разных видов минерального сырья (полезных компонентов и сортов) в объеме разрушаемого массива. БВР при объемном воздействии на массив вызывает дезинтеграцию на отдельные элементы (фрагменты) с некоторой укрупненной совокупностью объединяющих признаков в крупных кусках продуктов взрыва, таких как:

- сортность полезного ископаемого, содержание полезных компонентов (извлекаемых минералов) и их групп;
- содержание вредных включений (примесей) и их групп.

Основным фактором, влияющим на дезинтеграцию по слагающим текстурным блокам массива с различными акустическими жесткостями, является трещиноватость (блочность), а также механизмы динамической и волновой теории взрыва. Так, поршневое давление газообразных продуктов взрыва оказывает основное разрушающее действие в мелкотрещиноватых горных породах, а в средне- и крупноблочных породах разрушение происходит как за счет волн напряжений, распространяющихся от заряда в сторону свободной поверхности и во все стороны, так и за счет волны, отраженной от свободной поверхности [9-11].

Напряжения, генерируемые взрывом скважинного заряда, пропорциональны скорости смещения в рассматриваемых точках массива и акустической жесткости:

$$\sigma_{сж(р)} = \rho_0 C_p V_{сж(р)}, \quad (1)$$

где $\sigma_{сж(р)}$ – действующие сжимающие (растягивающие) напряжения, Па; ρ_0 – удельная масса горной породы, кг/м³; C_p – скорость распространения продольной упругой волны в массиве (образце), м/с; $V_{сж(р)}$ – скорость смещения массива при действии сжимающих (растягивающих) напряжений, м/с.

Критическая скорость смещения среды связана с действующим напряжением посредством следующей зависимости [12, 13]:

$$V_{кр}^{сж(р)} = \frac{\sigma_{сж(р)}}{\rho_0 C_p} K_d, \quad (2)$$

где K_d – коэффициент динамичности.

Условием селективного разрушения среды, отделение от массива и перемещения является равенство или превышение возникающих при взрывном нагружении массива скоростей смещения критическим значениям:

$$V_{сж(р)} \geq V_{кр}^{сж(р)}, \quad (3)$$

где $V_{сж(р)}$ – скорость смещения среды при воздействии сжимающих (растягивающих) динамических напряжений, м/с; $V_{кр}^{сж(р)}$ – минимальные (критические) значения скорости смещения массива, при которой происходит разрушение за счет сжимающих (растягивающих) напряжений, м/с.

Возникающие при взрыве скорости смещения массива в данной точке [14, 15] определяются как

$$V_{сж(р)} = k_v \bar{r}^{-v}, \quad (4)$$

где k_v – сейсмический коэффициент пропорциональности, зависящий от упругих параметров разрушаемых горных пород [3],

$$k_v = \sqrt[3]{\frac{C_p}{9\rho_0} \left(\frac{1+\mu}{1-\mu} \right)^2} = \sqrt[3]{\frac{C_p}{\rho_0} \left(1 - \frac{4C_p^2}{3C_p^2} \right)^2}, \quad (5)$$

μ – коэффициент Пуассона; $v = 2,25$ – показатель степени; \bar{r} – эквивалентное приведенное расстояние, м/кг ^{$\frac{1}{3}$} .

Эквивалентное приведенное расстояние [4]

$$\bar{r} = \frac{r_n}{\sqrt[3]{Q_{экр}}}, \quad (6)$$

где r_n – расстояние от исследуемой точки до центра тяжести эквивалентного заряда, м; $Q_{экр}$ – эквивалентная масса заряда, кг.

Получаем, что при подготовке горной породы к выемке путем БВР размеры текстурно-структурных отдельностей соизмеримы с длинами упругих волн, распространяющихся в неоднородных и трещиноватых минеральных средах. Поэтому при проявлении резонансных явлений в отдельностях структурной неоднородности соответствующего масштаба механизм разрушения волновой теории является основным, способным усилить эффект селективной дезинтеграции массива. Таким образом, согласно волновой теории взрывного разрушения в массиве создается стене-

рированная упругая волна различной длины, регулируемая параметрами взрывного импульса и в целом буровзрывными работами:

- масса заряда взрывчатых веществ;
- типы взрывчатых веществ и конструкция их зарядов;
- геометрия сетки скважин;
- номиналы интервалов замедления и число ступеней замедления.

То есть в результате взрывного воздействия на массив возможно получить гранулометрический состав с фракциями кусков не в виде хаотичного распределения групп, а с размерами ряда, соответствующего текстурно-структурным неоднородностям в массиве для последующей переработки.

Таким образом, селективное разрушение (дезинтеграция) при БВР – это не только качественный процесс отделения от массива, но и управление качеством минерального сырья и энергозатратами на стадиях добычи и переработки путем формирования текстурных элементов разделения, пригодных для первичной стадии переработки минерального сырья по требуемым характеристикам (признакам) качества.

Так, на первой стадии подготовки полезного ископаемого к выемке из взорванной горной массы выделяются куски или так называемые текстурно-структурные блоки размером от 500 мм и ниже с селективно сконцентрированными разделительными характеристиками (признаками). БВР кроме разупрочнения массива параллельно решают задачу увеличения микротрещин (микронарушений), то есть дополнительного избирательного разупрочнения уже среди минеральных групп на более низком структурном уровне, что позволяет снизить энергоемкость последующих стадий переработки – мелкого дробления и измельчения.

Современные подходы и методики в теории и практике БВР позволяют оценивать макросвойства горных пород (трещиноватость), описывать и идентифицировать неоднородность как в массиве, так и в развале и имеют все предпосылки для селективной добычи и переработки минерального сырья. А современные геологические и геомеханические модели массива позволяют определять дополненные параметры неоднородности по текстурным характеристикам распределения минералов и минеральных комплексов по различным структурным элементам неоднородности и их физико-механическим свойствам. Таким образом, совершенствование технологии и определение рациональных параметров БВР по критерию текстурно-структурной неоднородности является основной задачей се-

лективного разрушения (дезинтеграции) по текстурным характеристикам с генерацией микротрещин на структурном уровне.

Для многосортных (многокомпонентных) полезных ископаемых предлагаемый подход позволяет уже на стадии подготовки с помощью БВР получать задаваемую совокупность продуктов, пригодных для формирования разных концентрированно-усредненных в пределах разделяемых кусков горной массы по сортам, содержанию извлекаемых полезных компонентов, минералов и минеральных комплексов. Данный подход реализуем также и для однокомпонентных месторождений, то есть с однородной текстурой и структурой. При этом это может быть макроструктурная текстурная неоднородность в массиве за счет вредных примесей и включений [16], которая во многом определяет качественные свойства сортов полезного ископаемого и является фактором селективной подготовки минерального сырья на этапе БВР. Так, текстурно-структурные характеристики полезного ископаемого, влияющие на процесс обогатительного передела, являются критерием селективного выделения их в массиве при взрывной подготовке. При этом оптимизация энергоемкости процессов дальнейшей дезинтеграции должна осуществляться по эффективным режимам дробления и измельчения в зависимости от селективно отобранных групп с соответствующими характеристиками.

Таким образом, селективную подготовку полезного ископаемого необходимо рассматривать как иерархию структур и процессов разрушения при добыче и переработке, где БВР имеют более высокий масштабный уровень (см. **рис. 1**). То есть селективная подготовка полезного ископаемого рассматривается как совокупность технологий добычи и переработки минерального сырья с учетом стадийности селективной дезинтеграции по широкому спектру разделительных характеристик (текстурным, структурным и физико-механическим свойствам), формирующих различные группы горной массы на всех стадиях, начиная с БВР. Поэтому на этапе проектной документации для определения рациональных параметров БВР необходимо выполнять районирование карьерного поля по геологическим данным (свойства и характеристики залегания полезного ископаемого).

Селективное разрушение при добыче и переработке необходимо рассматривать не только с технологической точки зрения, но и с технико-экономической, с увязкой буровзрывной подготовки в единую экономическую модель перерас-

пределения затрат (материальных, трудовых, энергетических, финансовых и организационных), предполагающую широкий спектр товарной продукции. При этом повышение затрат на качественное проведение БВР ведет к снижению затрат на дальнейших переделах дезинтеграции и, как следствие, к повышению экономической эффективности переработки минерального сырья. Данная модель совокупности всего цикла переработки полезного ископаемого позволит перераспределить ресурсы по различным переделам и создать оптимальную технологию добычи и переработки по технико-экономическим критериям. Математическая запись предлагаемой модели с целевой функцией и системой ограничений имеет следующий вид:

$$\mathcal{E}_{\text{подг}} = f(\text{ФМ}, K, T, C_{\text{комп}}) \rightarrow \max, \quad (7)$$

$$\begin{cases} \text{ФМ} = f(\text{трещиноватость, крепость}); \\ K = f(\text{текстура (структура), содержание (п.к., примеси), потери, засорение}); \\ T = f(\text{БВР, МП(ОГР), МП(ОПИ)}); \\ C_{\text{комп}} = f(\text{продукция, сортность, цена}). \end{cases}$$

где $\mathcal{E}_{\text{подг}}$ – эффект за счет селективной подготовки минерального сырья; ФМ – физико-механические свойства горных пород (трещиноватость и блочность, крепость) в массиве, определяющие вид товарной продукции минерального сырья; Т – технология подготовки минерального сырья при добыче и переработке; БВР – буровзрывная подготовка к выемке минерального сырья; МП(ОГР) – механическая подготовка минерального сырья при открытой геотехнологии; МП(ОПИ) – механическая подготовка минерального сырья при обогащательном переделе; $C_{\text{комп}}$ – совокупная ценность товарной продукции.

Для определения суммарной ценности всех видов товарной продукции предложена методика расчета, основанная на интегрировании видов (сорт) товарной продукции минерального сырья и фракционности щебня (вмещающие породы), поступающего на переработку:

$$C_{\text{комп}} = V_{\text{м}} \sum_{i=1}^{m=j} (D_i C_i + D_j C_j), \quad (8)$$

$$\text{при этом} \quad \left(\sum_{i=1}^m D_i + \sum_{j=1}^n D_j \right) \leq 1, \quad (9)$$

$$1 - \left(\sum_{i=1}^m D_i + \sum_{j=1}^n D_j \right) = \Pi, \quad (10)$$

где $V_{\text{м}}$ – балансовые запасы, т (м^3); D_i – доля объема i -го вида (сорта) товарной продукции; C_i – стоимость единицы i -го вида (сорта) товарной продукции; D_j – доля объема j -го фракционного состава в общем объеме вмещающих пород; C_j – стоимость единицы j -й фракции, руб./т(м^3); n – число фракций в объеме вмещающих пород; Π – потери, доли ед.

Процедура выбора технологии подготовки минерального сырья при добыче и переработке выполняется с учетом минимальных удельных затрат:

$$\begin{aligned} Z_y = (Z_{\text{БВР}} + Z_{\text{МП(ОГР)}} + Z_{\text{В-П}} + \\ + Z_{\text{тр-т}} + Z_{\text{МП(ОПИ)}}) \rightarrow \min, \end{aligned} \quad (11)$$

где $Z_{\text{БВР}}$ – удельные затраты при технологии подготовки минерального сырья к выемке с использованием БВР, руб./т(м^3); $Z_{\text{МП(ОГР)}}$ – удельные затраты при технологии механической подготовки минерального сырья к выемке, руб./т(м^3); $Z_{\text{В-П}}$ – удельные затраты при выемочно-погрузочных работах, руб./т(м^3); $Z_{\text{тр-т}}$ – удельные затраты на транспортирование (логистика), руб./т(м^3); $Z_{\text{МП(ОПИ)}}$ – удельные затраты на стадии технологии подготовки при переработке минерального сырья, руб./т(м^3).

Полученные результаты и их обсуждение

Таким образом, в настоящее время все виды минерального сырья, обладающие потребительской ценностью, имеют соответствующие технологии и технико-экономические модели их добычи и переработки, что соответствует современному варианту комплексной отработки месторождения, когда вмещающие породы и низкосортное сырье являются основой для производства материалов дорожной и строительной отрасли и это дополняет важность развития системы рационального недропользования в России. В связи с этим селективная подготовка при добыче и переработке минерального сырья с точки зрения селективной дезинтеграции на всех стадиях передела – это один из основных аспектов использования его в качестве инструмента рационального и комплексного недропользования. Дезинтеграция минерального сырья в процессах подготовки при добыче и переработке (рис. 2) состоит в следующем:

- на первом уровне текстурно-структурной иерархии дезинтеграции массива горной породы определяются рациональные параметры БВР, в результате которых в грансоставе разрушенной горной массы выделяются различные группы, сконцентрированные по сортам и минеральным комплексам крупностью до 500 мм (селективными параметрами структурных элементов разделения);
- из продуктов стадии буровзрывной подготовки для каждой сконцентрированной группы выбирается технология подготовки при переработке, определяется режим дезинтеграции в соответствии с их индивидуальными текстурно-структурными характеристиками;
- на втором уровне из продуктов первичной дезинтеграции (БВР) формируются вторичные группы с более высоким уровнем концентрирования извлекаемых полезных компонентов, минералов или минеральных комплексов, а также сор-

тов полезного ископаемого, которые являются новой совокупностью структурных элементов раскрытия на следующих стадиях дезинтеграции;

- на каждом последующем уровне формируются группы с меньшей дисперсией параметров структуры и разделительных признаков, своя технология и устройства подготовки, режим дезинтеграции в зависимости от структуры элемента раскрытия и соотношения физико-механических свойств слагающих минералов и сортов полезного ископаемого;

- цикличность процедур подготовки на стадии обогатительного передела до заданного спектра товарной продукции определяется качеством селективной подготовки на стадии добычи, то есть на первом уровне текстурно-структурной иерархии дезинтеграции за счет определения технологии и рациональных параметров БВР.

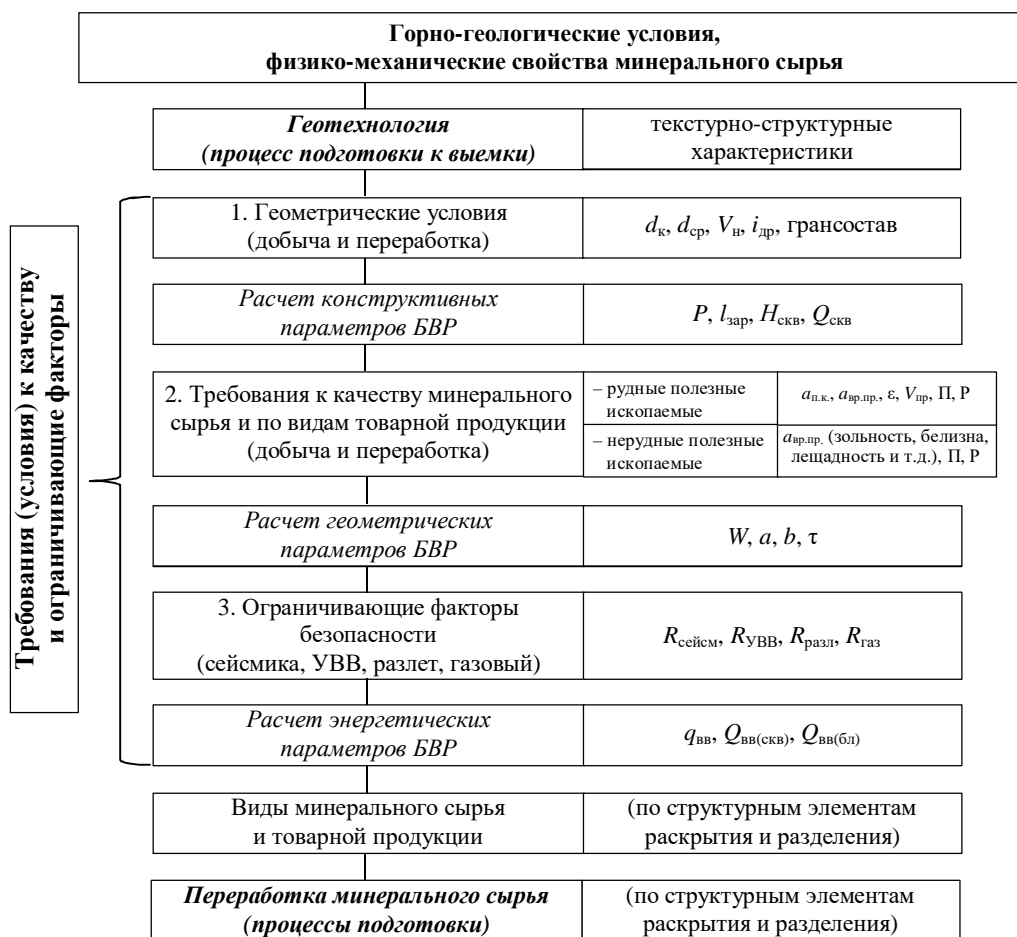


Рис. 2. Методика селективного разрушения (дезинтеграции) в процессах подготовки минерального сырья при добыче и переработке за счет управления параметрами буровзрывных работ при достижении требований к качеству

Fig. 2. The method of the selective destruction (disintegration) in the processes of the preparation of mineral raw materials during extraction and processing by controlling the parameters of drilling and blasting operations, while achieving quality requirements

Заключение

Таким образом, предлагаемая концепция селективной подготовки минерального сырья позволяет повысить эффективность добычи и переработки за счет обоснования рациональных параметров БВР, формирующих минеральные комплексы с заданной крупностью и селективными параметрами (признаками) структурных элементов разделения (по текстурно-структурным и физико-механическим характеристикам) в совокупность ценных товарных продуктов для выбора технологических схем, оборудования и режимов на следующих стадиях дезинтеграции.

Список источников

1. Хопунов Э.А. Новые аспекты избирательного разрушения минерального сырья // Известия вузов. Горный журнал. 2013. № 6. С. 130-138.
2. Козин В.З. Безотходные технологии горного производства // Известия вузов. Горный журнал. 2001. № 4/5. С. 169-190.
3. Обеспечение высокого качества взрывной подготовки пород к выемке при открытом способе добычи в сложных горно-геологических условиях и существенном росте масштабов работ / Пыталев И.А., Доможиров Д.В., Угольников Н.В., Прохоров А.А., Пронин В.В. // Маркшейдерский вестник. 2021. № 5-6 (144-145). С. 116-121.
4. Способ повышения качества подготовки пород к выемке при использовании эмульсионных взрывчатых веществ на карьерах с высокими уступами / Пыталев И.А., Доможиров Д.В., Швабенланд Е.Е., Прохоров А.А., Пронин В.В. // Маркшейдерский вестник. 2021. № 6 (145). С. 62-67.
5. Маляров И.П. Энергоемкость процессов разрушения горных пород при взрывании и механическом дроблении в горно-обогательном производстве: автореферат дис. ... д-ра техн. наук: 05.15.11, 05.15.03 / АН СССР. Институт угля. Кемерово, 1990. 46 с.
6. Тангаев И. А. Энергоемкость процессов добычи и переработки полезных ископаемых. М.: Недра, 1986.
7. Падуков В.А., Маляров И.П. Механика разрушения горных пород при взрыве. Иркутск: Изд-во ИГУ, 1985. 128 с.
8. Кутузов Б.Н. Методы ведения взрывных работ: учебник для вузов. Ч. 1. Разрушение горных пород взрывом. 2-е изд., стер. М.: Горная книга, 2009. 471 с.
9. Improving the production technology of drilling and blasting operations by blasting of high ledges / N.V. Ugolnikov, D.V. Domozhnikov, N.G. Karaulov, A.A. Prochorov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 15, Nizhny Tagil, 18-19 июня 2020 года. Nizhny Tagil, 2020. P. 012022. DOI: 10.1088/1757-899X/966/1/012022. EDN QXPNUD.

10. Угольников Н.В., Доможиров Д.В. Обоснование рациональных параметров расположения парно-сближенных скважин на карьерах нерудных строительных материалов // Комбинированная геотехнология: переход к новому технологическому укладу: сб. ст. по результатам Международной конференции. Магнитогорск, 2019. С. 361-369.
11. Повышение качества дробления и оптимизации параметров буровзрывных работ при применении эмульсионных ВВ и высокоуступной технологии добычи на рудных месторождениях / Доможиров Д.В., Пыталев И.А., Носов И.И., Носов В.И. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2016. № S36. С. 35-42.
12. Пергамент В.Х. Учет пространственной рассредоточенности заряда ВВ в задачах взрывного дела // Инженерные методы управления действием взрыва: сб. науч. тр. Магнитогорск: МГМИ, 1971. Вып. 89. С. 3-14.
13. Пергамент В.Х. Критические скорости и параметры буровзрывных работ // Инженерные методы управления действием взрыва: сб. науч. тр. Магнитогорск: МГМИ, 1971. Вып. 89. С. 40-48.
14. Pergament V., Malarov I., Firstov P., Gitterman Y. Experimental evaluation of near-source seismic effects of quarry blasts // XXVI General Assambley of the Evropen Seismological Commission (ESC). TEL AVIV, 1998, p. 29.
15. Pergament V., Melnikov Iv., Suraev V., Melnikov I., Vassiliev K., Kotik M., Shevtsov N. Ensuring seismic safety of the explosive works and evaluation of the consequences related to technogenic and natural seismic events // Minno delo i Geologia. Bulgaria, 1000 Sofia. 2014, no. 1-2, pp. 57-63.
16. Прохоров А.А. Обоснование параметров открытой геотехнологии для комплексного освоения месторождений белого мрамора: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск, 2022. 22 с.

References

1. Khopunov E.A. New aspects of the selective destruction of mineral raw materials. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal* [News of Higher Educational Institutions. Mining Journal]. 2013;(6):130-138. (In Russ.)
2. Kozin V.Z. Waste-free mining technologies. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal* [News of Higher Educational Institutions. Mining Journal]. 2001;(4/5):169-190. (In Russ.)
3. Pytalev I.A., Domozhnikov D.V., Ugolnikov N.V., Prokhorov A.A., Pronin V.V. Ensuring a high quality of the blasting preparation of rocks for excavation with an open mining method in difficult mining and geological conditions and a significant increase in the scale of operations. *Marksheiderski vestnik* [Mine Surveying Bulletin]. 2021;(5-6(144-145)):116-121. (In Russ.)
4. Pytalev I.A., Domozhnikov D.V., Shvabenland E.E., Prokhorov A.A., Pronin V.V. Method of improving

- the quality of the preparation of rocks for excavation when using emulsion explosives in quarries with high ledges. *Marksheiderski vestnik* [Mine Surveying Bulletin]. 2021;(6(145)):62-67. (In Russ.)
5. Malyarov I.P. Energy intensity of the rock destruction processes during blasting and mechanical crushing in mining and processing: abstract of the thesis of doctor of engineering sciences. Kemerovo: The USSR Academy of Sciences. Coal Institute; 1990. 46 p. (In Russ.)
 6. Tangaev I.A. Energy intensity of mining and processing of minerals. Moscow: Nedra, 1986. (In Russ.)
 7. Padukov V.A., Malyarov I.P. Mechanics of rock destruction during explosion. Irkutsk: Publishing House of Irkutsk State University; 1985. 128 p. (In Russ.)
 8. Kutuzov B.N. Methods of blasting operations: university textbook. Part 1. Destruction of rocks by blasting. Moscow: Gornaya kniga; 2009. 471 p. (In Russ.)
 9. Ugolnikov N.V., Domozhirov D.V., Karaulov N.G., Prokhorov A.A. Improving the production technology of drilling and blasting operations by blasting of high ledges. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 15, Nizhny Tagil, 18-19 June 2020. Nizhny Tagil; 2020:012022. DOI 10.1088/1757-899X/966/1/012022.
 10. Ugolnikov N.V., Domozhirov D.V. Providing a rationale for reasonable parameters of the location of paired-contiguous wells in quarries of non-metallic building materials. Combined Geotechnology: Transition to a New Technological Paradigm. Collection of articles of the International Conference. Magnitogorsk; 2019;361-369. (In Russ.)
 11. Domozhirov D.V., Pytalev I.A., Nosov I.I., Nosov V.I. Improving the quality of crushing and optimizing the parameters of drilling and blasting operations when using emulsion explosives and high-ledge mining technology at ore deposits. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal)* [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. 2016;(S36):35-42. (In Russ.)
 12. Pergament V.Kh. Factoring into the spatial dispersion of the explosive charge in blasting. Engineering methods of explosion control: proceedings. Magnitogorsk: Magnitogorsk Institute of Mining and Metallurgy; 1971;(89):3-14. (In Russ.)
 13. Pergament V.Kh. Critical speeds and parameters of drilling and blasting operations. Engineering methods of explosion control: proceedings. Magnitogorsk: Magnitogorsk Institute of Mining and Metallurgy; 1971;(89):40-48. (In Russ.)
 14. Pergament V., Malarov I., Firstov P., Gitterman Y. Experimental evaluation of near-source seismic effects of quarry blasts. The 26th General Assembly of the European Seismological Commission (ESC). Tel Aviv; 1998;29.
 15. Pergament V., Melnikov I., Suraev V., Melnikov I., Vassiliev K., Kotik M., Shevtsov N. Ensuring seismic safety of the explosive works and evaluation of the consequences related to technogenic and natural seismic events. *Minno delo i Geologia*. Bulgaria, Sofia; 2014;(1-2):57-63.
 16. Prokhorov A.A. Providing a rationale for parameters of open geotechnology for integrated development of white marble deposits: abstract of the thesis of PhD in engineering sciences. Magnitogorsk; 2022. 22 p. (In Russ.)

Поступила 01.03.2023; принята к публикации 15.03.2023; опубликована 27.03.2023
Submitted 01/03/2023; revised 15/03/2023; published 27/03/2023

Доможиров Дмитрий Викторович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: dvd1975@mail.ru. ORCID 0000-0001-9904-5820

Dmitry V. Domozhirov – PhD (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mineral Deposits Development, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
E-mail: dvd1975@mail.ru. ORCID 0000-0001-9904-5820

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

УДК 622.271

DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-1-15-23



ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕРИЙНО ВЫПУСКАЕМЫХ МОДЕЛЕЙ ВЫЕМОЧНО-ПОГРУЗОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ РАЗНЫХ ТИПОВ

Логинов Е.В., Масальский С.С.

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). В современном мире существует необходимость рационализации способов добычи полезных ископаемых при постоянном увеличении эксплуатационных мощностей карьеров. На современных карьерах применяются различные виды горного оборудования для выемочно-погрузочных работ: канатные (тросовые) экскаваторы, гидравлические экскаваторы типа прямая и обратная лопата, фронтальные погрузчики и т.д. Стоит отметить, что одноковшовые экскаваторы на данный момент являются наиболее распространенной выемочно-погрузочной техникой. За счет своих конструктивных особенностей данное оборудование позволяет применять разные технологические схемы разработки месторождений открытым способом. Фронтальные погрузчики, в свою очередь, применяются в основном в качестве вспомогательного оборудования. Однако фронтальные погрузчики могут применяться на добычных работах в тех случаях, когда технологические схемы и конструктивные особенности позволяют достичь максимальной эффективности. В определенных горнотехнических условиях применение фронтальных погрузчиков может оказаться более целесообразным, чем использование других типов горного оборудования. **Новизна.** Описанием применения выемочно-погрузочных машин занимались многие учёные, однако некоторые данные являются устаревшими, тогда как текущее исследование относится к более современной горной технике. **Результат.** Анализ и обобщение данных показали возможность применения фронтальных погрузчиков как основного выемочно-погрузочного оборудования на карьере. В ходе исследования получены зависимости высоты черпания и разгрузки, усилия отрыва от вместимости ковша для одноковшовой выемочно-погрузочной техники. **Практическая значимость.** Полученные в ходе исследования данные могут быть применены как в проектных организациях, так и при корректировании добычных работ непосредственно на месторождении для обоснования выбора выемочно-погрузочной техники, работающей непосредственно в забое.

Ключевые слова: карьерные экскаваторы, фронтальные погрузчики, высота разгрузки, высота черпания, усилие отрыва, выемочно-погрузочные работы, забой, технологическая схема

© Логинов Е.В., Масальский С.С., 2023

Для цитирования

Логинов Е.В., Масальский С.С. Исследование технических характеристик серийно выпускаемых моделей выемочно-погрузочного оборудования разных типов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №1. С. 15-23. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-15-23>



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

RESEARCH ON TECHNICAL CHARACTERISTICS OF MASS-PRODUCED MODELS OF EXTRACTION AND LOADING EQUIPMENT OF VARIOUS TYPES

Loginov E.V., Masalskiy S.S.

Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). In today's world there is a need for rationalizing the methods of mining with a constant increase in the production capacity of open pits. In the existing open pits, extraction and loading operations are conducted by using various types of mining equipment: rope shovels, face and backhoe hydraulic shovels, front-end loaders, etc. It should be noted that power shovels are currently the most widespread extraction and loading equipment. Due to its design features, various plans of open pit mining may be used. Front-end loaders, in turn, are mainly used as auxiliary equipment. However, front-end loaders can be used in extraction operations, when process flow charts and design features contribute to achieving maximum efficiency. In some mining conditions, it may be more appropriate to use front-end loaders than other types of mining equipment. **Originality.** The use of extraction and loading equipment has been described by many scientists, but some data are outdated, while the current research is relevant for modern mining machinery. **Results.** Data analysis and integration have shown a potential use of front-end loaders as main extraction and loading equipment in open pits. The studies resulted in establishing dependences between digging height and dump height, bucket breakout force and bucket capacity for shovels and front-end loaders. **Practical Relevance.** The obtained data can be applied both in designing and making corrections to mining operations directly on deposits to provide rationale for choosing extraction and loading equipment operating at a face.

Keywords: mining shovels, front-end loaders, dump height, digging height, breakout force, extraction and loading, face, process flow chart

For citation

Loginov E.V., Masalskiy S.S. Research on Technical Characteristics of Mass-Produced Models of Extraction and Loading Equipment of Various Types. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 1, pp. 15-23. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-15-23>

Введение

При разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом выемочно-погрузочные работы являются основным технологическим процессом. От качественного ведения данного процесса зависит основной показатель разработки, а именно производительность предприятия по полезному ископаемому, которая, в свою очередь, влияет на экономическую пригодность карьера.

Качество и скорость выемочно-погрузочных работ зависят от техники, технологии и индивидуальны для конкретного месторождения [1-3]. Наиболее распространенным оборудованием, применяемым на карьерах, являются одноковшовые экскаваторы. Многоковшовые экскаваторы в основном применяются на мощных месторождениях пологого и горизонтального залегания. В специальную группу выемочно-погрузочной техники можно выделить фронтальные погрузчики. Данное оборудование в большинстве случаев применяется как вспомогательное. Однако в некоторых случаях фронтальные по-

грузчики могут быть применены в качестве основного оборудования для разработки забоя.

Изучением фронтальных погрузчиков, карьерных одноковшовых экскаваторов и их применением занимались многие ученые: проф. Репин Н.Я., проф. Репин Л.Н., проф. Холодняков Г.А., проф. Хорешок А.А., проф. Фомин С.И., к.т.н. Лигоцкий Д.Н., к.т.н. Журавлёв А.Г., к.т.н. Loginov E.V., к.т.н. Макаров В.Н. и др. [4-6]. Изучением выемочно-погрузочной техники также занимались иностранные учёные [7-9]. В своих трудах исследователи определили область применения данных горных машин, к примеру, Журавлёв А.Г. обосновал, как зависит производительность фронтальных погрузчиков от расстояния транспортирования при их использовании в качестве выемочно-транспортного оборудования [10]. Ученые также занимались обоснованием технологических расчётов для горных машин, определением схем работы выемочного оборудования при различных условиях [11-13]. Лигоцкий Д.Н. описал схемы применения экскаваторов и погрузчиков на строительных карьерах [14, 15].

В учебном пособии «Выемочно-погрузочные работы» проф. Репин Н.Я. и проф. Репин Л.Н. описали область применения фронтальных погрузчиков. При небольших объемах добычных работ фронтальные погрузчики могут применяться в качестве основного выемочно-погрузочного оборудования в комплексе с автосамосвалами. При небольшой дальности перевозки пород они успешно работают как выемочно-транспортирующие машины, заменяя собой экскаваторы и автосамосвалы. Весьма эффективно использование погрузчиков в комплексе с механическими рыхлителями и бульдозерами – когда бульдозеры формируют штабели из разрыхленной породы, а погрузчики осуществляют ее погрузку в транспортные средства. На крупных карьерах погрузчики работают в сочетании с мощными экскаваторами, в частности, при селективной разработке сложных забоев, представленных разнородными рудами, при выемочно-погрузочных работах в стесненных условиях, где затруднена работа экскаваторов, для работы на перегрузочных пунктах, складах и др. При использовании комбинированного транспорта погрузчики успешно справляются с доставкой горной массы от забоев к внутри-карьерным дробильно-перегрузочным пунктам, рудоспускам, к перегрузочным устройствам скиповых подъемников [16].

Описание применения фронтальных погрузчиков можно назвать полным, однако исследования производились в основном до 2010 года [17-19] и некоторые данные являются устаревшими. К примеру, в книге «Выемочно-погрузочные работы» указывается, что наибольший объем ковша для фронтальных погрузчиков равен 21 м^3 , однако на данный момент погрузчик WE2350-2 фирмы Komatsu при комплектации super high lift имеет ковш объемом $53,5 \text{ м}^3$.

Методы исследования

Проведены анализ и изучение литературы, теории и практики применения канатных, гидравлических экскаваторов и фронтальных погрузчиков на карьерах. Также анализ специализированной литературы фирм производителей карьерной техники с целью сбора основных технических характеристик, применение цифровых технологий для аналитического сравнения данных и графического отображения полученных результатов.

Данное исследование посвящено обоснованию параметров системы разработки при использовании выемочно-погрузочной техники, а имен-

но одноковшовых экскаваторов и фронтальных погрузчиков. Одноковшовые экскаваторы, применяемые при выемочно-погрузочных работах, имеют большой спектр применений и делятся по характеру приведения стрелы в действие на следующие виды: тросовые (канатные) механические лопаты, гидравлические экскаваторы с прямой или обратной лопатой [20-22].

Тросовые (канатные) экскаваторы применяются при выемке пород верхним черпанием и разгрузкой ковша как на уровне установки экскаватора (в стандартном исполнении рабочего оборудования), так и на уровне верхней площадки уступа (при удлиненном рабочем оборудовании) [23-25]. Гидравлические экскаваторы типа прямая лопата – верхнее черпание с разгрузкой на уровне экскаватора, а обратные лопаты – как нижнее, так и верхнее черпание с разгрузкой и на уровне стояния, и на нижнюю площадку уступа [26].

Фронтальные погрузчики, в силу строения и конструкции, могут применяться только при верхнем черпании. Разгрузка производится на уровне установки погрузчика, однако для расширения технических характеристик может применяться оборудование super high lift, что позволяет увеличить высоту разгрузки.

Полученные результаты и их обсуждение

Основной идеей данного исследования является сравнение технических характеристик серийно выпускаемого оборудования, которое применяется на выемочно-погрузочных работах. Коллективом авторов предложены следующие обозначения: тросовый (канатный) экскаватор типа прямая механическая лопата – ЭК, гидравлический экскаватор типа прямая лопата – ЭГ, гидравлический экскаватор типа обратная лопата – ЭГО, фронтальный погрузчик – ФП. Были проанализированы основные технические характеристики одноковшовых экскаваторов фирм ТУНИ, НІТАСНІ, Caterpillar, Liebherr, Komatsu, УЗТМ-КАРТЭКС и фронтальных погрузчиков, производимых компаниями «БелАЗ», Caterpillar, НІТАСНІ, Liebherr, Komatsu. Данное оборудование было разделено по вместимости ковша на 7 групп: ~5, ~8, ~11,5, ~23, ~33, ~40, ~50 м^3 , основные результаты представлены в табл. 1-7.

Из табл. 1 видно, что ФП уступают ЭК по всем техническим характеристикам, причём четкой зависимости разницы характеристик от объема ковша не просматривается.

Таблица 1. Модельный ряд фронтальных погрузчиков, одноковшовых карьерных экскаваторов и их технические характеристики при вместимости ковша $\sim 5 \text{ м}^3$

Table 1. Model range of front-end loaders, power shovels and their performance at a bucket capacity of $\sim 5 \text{ м}^3$

Вид	Фирма	Модель	Вместимость ковша, м^3	Усилие отрыва, кН	Высота разгрузки, м	Высота черпания, м
ФП	Caterpillar	986K (High Lift)	5,1	313	3,54	7,28
ФП	НІТАСНІ	ZW550-6	5,4	377	3,80	7,34
ЭГ	Liebherr	R 980 SME	5,1	500	8,00	11,00
ЭГО	Caterpillar	395	5,2	383	9,25	13,54
ЭК	ТУНІ	WK-4D	4,0	–	6,30	10,10
ЭК	УЗТМ-КАРТЭКС	ЭКГ-5А	5,2	500	6,70	10,30

Таблица 2. Модельный ряд фронтальных погрузчиков, одноковшовых карьерных экскаваторов и их технические характеристики при вместимости ковша $\sim 8 \text{ м}^3$

Table 2. Model range of front-end loaders, power shovels and their performance at a bucket capacity of $\sim 8 \text{ м}^3$

Вид	Фирма	Модель	Вместимость ковша, м^3	Усилие отрыва, кН	Высота разгрузки, м	Высота черпания, м
ФП	Caterpillar	988K (High Lift)	8,0	381	4,04	8,22
ФП	Liebherr	L 586 XPower (High Lift)	8,5	240	5,10	7,70
ЭГ	Liebherr	R 9150 G7	8,3	720	8,80	13,20
ЭГО	Caterpillar	6015	8,1	538	–	12,80
ЭК	УЗТМ-КАРТЭКС	ЭКГ-8И	8,0	–	8,6	13,2

Таблица 3. Модельный ряд фронтальных погрузчиков, одноковшовых карьерных экскаваторов и их технические характеристики при вместимости ковша $\sim 11,5 \text{ м}^3$

Table 3. Model range of front-end loaders, power shovels and their performance at a bucket capacity of $\sim 11.5 \text{ м}^3$

Вид	Фирма	Модель	Вместимость ковша, м^3	Усилие отрыва, кН	Высота разгрузки, м	Высота черпания, м
ФП	Белаз	78250	11,5	–	3,80	7,34
ФП	Komatsu	WA800-8	11,5	690	4,61	9,50
ЭГ	НІТАСНІ	EX1200-7	12,0	709	10,35	14,67
ЭГО	Caterpillar	6020B	12,0	730	–	13,90
ЭК	ТУНІ	WK-12C	12,0	–	8,60	13,53
ЭК	УЗТМ-КАРТЭКС	ЭКГ-12К	12,0	–	8,3	14,0

Таблица 4. Модельный ряд фронтальных погрузчиков, одноковшовых карьерных экскаваторов и их технические характеристики при вместимости ковша $\sim 23 \text{ м}^3$

Table 4. Model range of front-end loaders, power shovels and their performance at a bucket capacity of $\sim 23 \text{ м}^3$

Вид	Фирма	Модель	Вместимость ковша, м^3	Усилие отрыва, кН	Высота разгрузки, м	Высота черпания, м
ФП	Komatsu	WE1350-3	22,9	978	6,42	11,40
ФП	Caterpillar	994K	24,5	1 206	6,10	11,77
ЭГ	НІТАСНІ	EX3600-7	22,0	1 030	10,99	16,75
ЭГО	Liebherr	R 9400 G6	24,0	1 000	10,60	15,70
ЭК	Komatsu	2300XPC AC	25,0	–	8,50	13,50
ЭК	УЗТМ-КАРТЭКС	ЭКГ-20КМ	25	–	10,0	16,8

Таблица 5. Модельный ряд фронтальных погрузчиков, одноковшовых карьерных экскаваторов и их технические характеристики при вместимости ковша $\sim 33 \text{ м}^3$

Table 5. Model range of front-end loaders, power shovels and their performance at a bucket capacity of $\sim 33 \text{ м}^3$

Вид	Фирма	Модель	Вместимость ковша, м^3	Усилие отрыва, кН	Высота разгрузки, м	Высота черпания, м
ФП	Komatsu	WE1850-3	32,9	1 075	6,48	12,57
ЭГ	Caterpillar	6060 AC FS	34,0	1 730	11,60	15,50
ЭГО	НІТАСНІ	EX5600-6	34,0	1 480	12,20	19,70
ЭК	УЗТМ-КАРТЭКС	ЭКГ-32Р	35,0	–	11,8	18,3

Таблица 6. Модельный ряд фронтальных погрузчиков, одноковшовых карьерных экскаваторов и их технические характеристики при вместимости ковша $\sim 40 \text{ м}^3$

Table 6. Model range of front-end loaders, power shovels and their performance at a bucket capacity of $\sim 40 \text{ м}^3$

Вид	Фирма	Модель	Вместимость ковша, м^3	Усилие отрыва, кН	Высота разгрузки, м	Высота черпания, м
ФП	Komatsu	WE2350-2	40,5	1 173	7,03	13,39
ЭГ	Liebherr	R 9800 G6	42,0	2 395	12,40	19,90
ЭГО	НІТАСНІ	EX8000-6	43,0	2 020	11,90	19,00
ЭК	Caterpillar	7295	39,0	–	8,40	13,70
ЭК	УЗТМ-КАРТЭКС	ЭКГ-35	35,0	–	12,3	19,30

Таблица 7. Модельный ряд фронтальных погрузчиков, одноковшовых карьерных экскаваторов и их технические характеристики при вместимости ковша $\sim 50 \text{ м}^3$

Table 7. Model range of front-end loaders, power shovels and their performance at a bucket capacity of $\sim 50 \text{ м}^3$

Вид	Фирма	Модель	Вместимость ковша, м^3	Усилие отрыва, кН	Высота разгрузки, м	Высота черпания, м
ФП	Komatsu	WE2350-2 (Super High Lift)	53,5	980	9,53	15,85
ЭК	ТУНІ	WK-55	55,0	–	10,06	18,10
ЭК	Komatsu	4100C BOSS	49,0	–	9,50	16,90
ЭК	Caterpillar	7395	55,8	–	9,40	14,90
ЭК	Caterpillar	7495	62,7	–	10,06	16,30

Исходя из собранных данных, фирма производитель Komatsu является единственной компанией на данный момент, производящей фронтальные погрузчики с вместимостью ковша более 25 м^3 .

При проектировании карьеров необходимо обосновывать высоту уступов. В основном высота уступа задается проектом на стадии проектирования и остается постоянной на весь срок отработки или корректируется на определенном этапе разработки [27]. Высота уступа влияет на скорость углубки карьера и тип применяемой техники. Основной характеристикой выемочной техники, зависящей от высоты уступа, является высота черпания. В ходе исследования были проанализированы основные серийно выпускае-

мые модели ФП, ЭК, ЭГ, и ЭГО. Так как проанализированные технические характеристики гидравлических экскаваторов типа прямая и обратная лопата схожи, поэтому ЭГ и ЭГО были выделены в одну группу. В ходе исследования была получена нелинейная зависимость высоты черпания от вместимости ковша (рис. 1).

На рис. 1 можно наглядно увидеть, как статистически выглядит разница между высотой черпания у фронтальных погрузчиков и карьерных экскаваторов. Проанализировав рис. 1, приходим к выводу, что фронтальные погрузчики имеют меньшую высоту черпания, но для некоторых типоразмеров разница незначительная, (например, в классе более 50 м^3 данное значение

для ФП практически одинаковое с ЭК). В итоге можно сделать вывод, что при рассмотрении только высоты черпания, как основного фактора между двумя видами техники, фронтальные погрузчики фирмы Komatsu с объёмом ковша более 20 м³ могут соперничать с некоторыми ЭК – при потере высоты черпания в диапазоне (2,5-18,5)%. Что интересно, в классе объема ковша свыше 50 м³ фронтальный погрузчик WE2350-2 (с оборудованием super high lift) имеет большую на 0,95 м высоту черпания, то есть на 6,4%, чем у канатного экскаватора фирмы Caterpillar, при возможности номинального уравнивания вместимостей их ковшей.

В среднем же высота черпания ФП отличается на 32,2% от ЭК и на 54,5% от ЭГ и ЭГО.

Высота разгрузки выемочно-погрузочного оборудования также является важной характеристикой при эффективной работе карьера. Данная характеристика необходима для эффективной работы звена экскаватор/погрузчик – автосамосвал, основанной на возможности загрузки транспортных средств (учитываются габаритные размеры автотранспорта). Если высота разгрузки недостаточная, то использование автосамосвалов большой грузоподъемности будет невозможно. На основании сопоставления информации была получена зависимость высоты разгрузки от вместимости ковша (рис. 2).

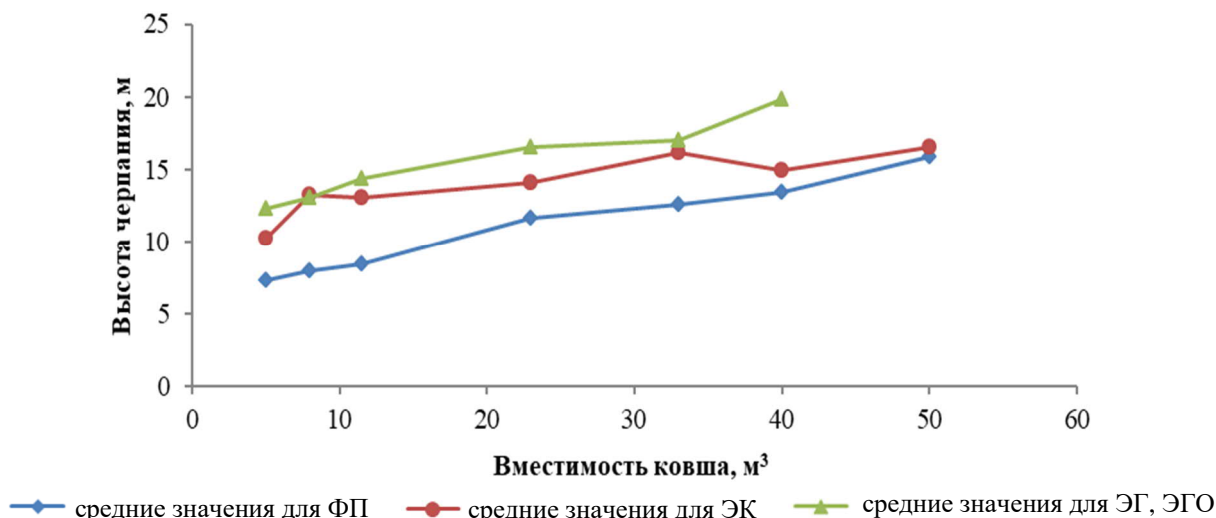


Рис. 1. Зависимость средних значений высоты черпания ФП, ЭК, ЭГ и ЭГО от вместимости их ковша
Fig. 1. Dependence between average values of digging height of the front-end loader, the open pit excavator, the caterpillar shovel and the backhoe shovel and their bucket capacity

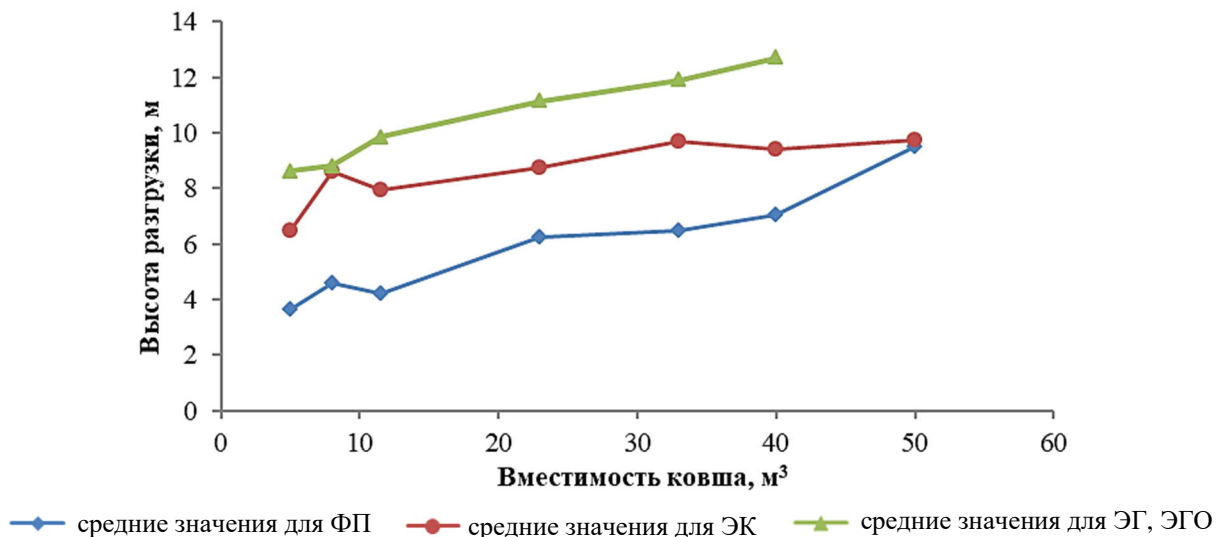


Рис. 2. Зависимость средних значений высоты разгрузки ФП, ЭК, ЭГ и ЭГО от вместимости их ковша
Fig. 2. Dependence between average values of breakout force of the front-end loader, the open pit excavator, the caterpillar shovel and the backhoe shovel and their bucket capacity

Фронтальные погрузчики со стандартным оборудованием объективно уступают в высоте разгрузки экскаваторам в силу конструктивных особенностей. В среднем эта разница равна 4,26 м – 70,4% (см. **рис. 2**). Однако эту разницу можно уменьшить благодаря оборудованию «high lift», «super high lift». Использование оборудования «high lift» присуще как ФП, так и карьерным экскаваторам. Данное оборудование позволяет увеличить высотные характеристики техники. При вместимости ковша более 50 м³ оборудование «super high lift» позволяет обеспечить равные параметры высоты разгрузки фронтального погрузчика и карьерного экскаватора, а в некоторых случаях даже превысить ее.

Также стоит отметить, что высота разгрузки для гидравлических экскаваторов и для ЭК в среднем отличается на 24,0%, что на 10% больше, чем при их сравнении по высоте черпания. Высота черпания ФП, в свою очередь, меньше, чем ЭГ, ЭГО, на 100,7% и на 54,3%, чем ЭК.

Заключительной характеристикой выемочно-погрузочной техники, рассматриваемой в данном исследовании, является усилие отрыва. От значений усилия отрыва зависят способы механизации основных технологических процессов: некоторые породы могут разрабатываться выемочно-погрузочной техникой самостоятельно (без предварительного рыхления) или насколько хорошо должен быть подготовлен массив (использование предварительной подготовки).

На основе анализа серийно выпускаемых моделей гидравлических экскаваторов, как прямой лопаты (ЭГ), так и обратной (ЭГО), и фронтальных погрузчиков (ФП) была получена зависимость средних значений усилия отрыва от вместимости их ковша (**рис. 3**).

Исходя из **рис. 3**, разница между средними значениями усилия отрыва между исследуемой техникой при вместимости ковша ~11,5 и ~23 м³ близка к нулю. Однако она начинает резко расти с увеличением объема ковша и к ~40 м³ значения в среднем отличаются на 1042 кН, что на 88,8% больше, чем усилие копания ФП при данной вместимости ковша.

Из этих данных следует, что целесообразность применения фронтальных погрузчиков с вместимостью ковша более 20 м³ при выемочно-погрузочных работах на месторождениях с крепкими породами находится под вопросом, так как затраты на буровзрывные работы увеличатся, тем не менее меньшая в несколько раз стоимость погрузчиков относительно экскаваторов может окупить эти вложения.

Важным фактором применения горнодобывающей техники является срок службы. Срок эксплуатации карьерного экскаватора определяется по нормативной, конструкторской и эксплуатационной документации на карьерный экскаватор, а также по стандартам и правилам безопасности. Срок эксплуатации для карьерных тросовых экскаваторов составляет 15-20 лет, в то время как эксплуатационный срок использования гидравлических экскаваторов не превышает 10-12 лет. Средний срок службы фронтального погрузчика на горном предприятии около 7-8 лет.

Полностью заменить один вид техники другим невозможно, поэтому изучение технических характеристик и применение выемочно-погрузочного оборудования разных типов позволит повысить эффективность открытой разработки.

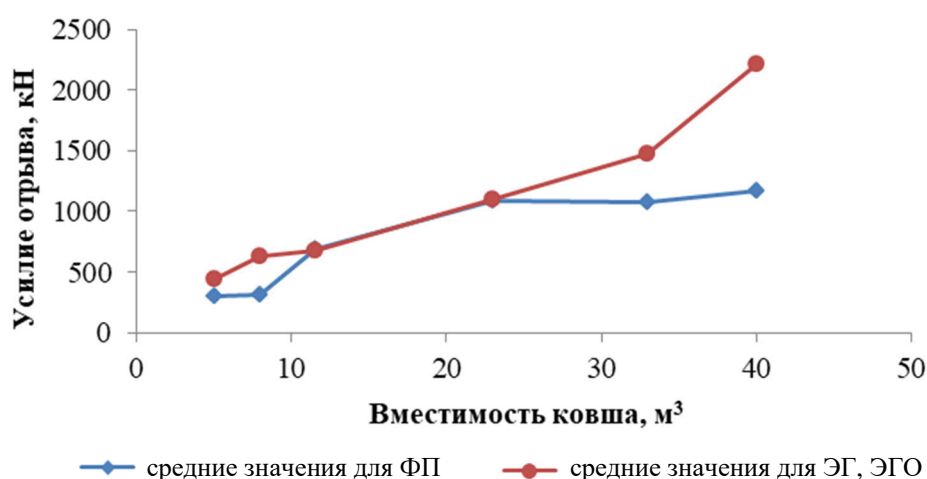


Рис. 3. Зависимость средних значений усилия отрыва ФП и экскаваторов ЭГ, ЭГО от вместимости их ковша
 Fig. 3. Dependence between average values of dump height of the front-end loader and the open pit excavator, the backhoe shovel and their bucket capacity

Заключение

1. Срок службы канатных экскаваторов почти в 2 раза больше, чем у ЭГ и ФП.
2. Гидравлические экскаваторы лидируют по усилию отрыва.
3. Канатные и гидравлические экскаваторы занимают лидирующие позиции по высоте черпания, высоте разгрузки.
4. Фронтальные погрузчики с вместимостью ковша от ~23 до ~50 м³ могут конкурировать по техническим характеристикам ЭК со сходными ковшами.
5. При типоразмере более 50 м³ разница между ФП ЭК минимальна, это обусловлено применением конфигурации оборудования Super High Lift.

Список источников

1. Холодныков Г.А., Логинов Е.В., Ву Дык Туан. Малоотходная открытая разработка полезных ископаемых с помощью гидравлических экскаваторов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. №1. С. 357-363.
2. Оценка показателей работоспособности карьерных экскаваторов в реальных условиях эксплуатации / А.А. Емельянов, Д.А. Шибанов, Е.В. Пумпур, С.Л. Иванов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. №10. С. 86-94.
3. Копанская А.А., Трейман М.Г. Анализ технико-экономических показателей транспортных систем горнообогатительных комплексов // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Экономика и экологический менеджмент». 2020. №4. С. 17-28.
4. Оценка степени взаимовлияния вместимости ковша экскаватора и кузова автосамосвала / А.А. Хорешок, Д.М. Дубинкин, М.А. Тюленев, С.О. Марков // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2021. №3. С. 104-112.
5. Fomin S.I., Ivanov V.V. Improving the reliability of opencast system for complex structure ore deposits // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2018, vol. 9, no. 13, pp. 36-43.
6. Холодныков Г.А., Аргимбаев К.Р., Решетняк С.П. Определение высоты добычного забоя при разработке хвостохранилищ гидравлическим экскаватором типа обратная лопата // Записки Горного института. 2012. Т. 195. С. 138-141.
7. Jung T., Raduenz H., Krus P., J. De Negri V., Lee J. Boom energy recuperation system and control strategy for hydraulic hybrid excavators. Automation in Construction. 2022, vol. 135, pp. 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104046>
8. Yuasa T., Ishikawa M. An Optimal design methodology for the trajectory of hydraulic excavators based on genetic algorithm // Journal of robotics and mechatronics. 2021, vol. 33, pp. 1248-1254. DOI: 10.20965/jrm.2021.p1248.

9. Li Y., Mu X., Fan R. Multi-objective optimization and simulation of novel working mechanism for face-shovel excavator // International Journal of Intelligent Robotics and Applications. 2021, vol. 5, no. 1, pp. 1-9. DOI: 10.1007/s41315-020-00160-1
10. Журавлёв А.Г., Черных В.В. Техничко-экономические расчёты применения погрузчиков в качестве выемочно-транспортного оборудования карьеров // Проблемы недропользования. 2021. №1. С. 45-55.
11. Иванов В.В., Дзюрич Д.О. Обоснование параметров технологической схемы разработки обводненных месторождений строительного песка // Записки Горного института. 2022. URL: <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.3>
12. Loginov E.V., Tyuleneva T.A. Control of quarry parameters to improve the efficiency of hydraulic backhoes // Ugol. 2021, vol. 12, pp. 6-10. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-12-6-10
13. Fomin S.I., Ivanov V.V., Semenov A.S., Ovsyannikov M.P. Incremental open-pit mining of steeply dipping ore deposits // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2020, vol. 11, no. 15, pp. 1306-1311.
14. Лигоцкий Д.Н., Фомин С.И. Технология разработки месторождений строительных материалов: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2011. 91 с.
15. Аргимбаев К.Р., Лигоцкий Д.Н. Открытая разработка месторождений строительных материалов: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2022. 104 с.
16. Репин Н.Я., Репин Л.Н. Выемочно-погрузочные работы: учеб. пособие. М.: Горная книга, 2012. 272 с.
17. Арсентьев А.И. Разработка месторождений твердых полезных ископаемых открытым способом. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2010. 115 с.
18. Анистратов Ю.И. Технология открытых горных работ. М.: ООО «НТЦ «Горное дело», 2008. 472 с.
19. Открытые горные работы: справочник / К.Н. Трубецкой, М.Г. Потапов, К.Е. Виницкий, Н.Н. Мельников и др. М.: Горное бюро, 1994. 590 с.
20. Drebenstedt C., Argimbaev K.R. Korkinsk brown coal open pit as a case study of endogenous fires // International Journal of Engineering, Transactions A: Basics. 2021, vol. 34, no. 1, pp. 292-304.

References

1. Kholodnyakov G.A., Loginov E.V., Vu Duc Tuan. Low-waste open-pit mining using hydraulic excavators. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin]. 2017;(1):357-363. (In Russ.)
2. Emelyanov A.A., Shibyanov D.A., Pumpur E.V., Ivanov S.L. Evaluation of working efficiency of open pit shovels in real operating conditions. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin]. 2020;(10):86-94. (In Russ.)

3. Kopanskaya A.A., Treyman M.G. Analysis of technical and economic indicators of transport systems of mining and processing complexes. *Nauchny zhurnal NIU ITMO. Seriya Ekonomika i ekologicheskii menedzhment* [Scientific journal of NRU ITMO. Series: Economics and Environmental Management]. 2020;(4):17-28. (In Russ.)
4. Khoreshok A.A., Dubinkin D.M., Tyulenev M.A., Markov S.O. Estimation of the degree of mutual influence of the excavator bucket capacity and haul truck body. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Vestnik of Kuzbass State Technical University]. 2021;(3):104-112. (In Russ.)
5. Fomin S.I., Ivanov V.V. Improving the reliability of opencast system for complex structure ore deposits. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2018;9(13):36-43.
6. Kholodnyakov G.A., Argimbaev K.R., Reshetnyak S.P. Determining the mine working height for the development of tailing dumps with a hydraulic backhoe excavator. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of the Mining Institute]. 2012;195:138-141. (In Russ.)
7. Jung T., Raduenz H., Krus P., J. De Negri V., Lee J. Boom energy recuperation system and control strategy for hydraulic hybrid excavators. *Automation in Construction*. 2022;135:1-20. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104046>
8. Yuasa T., Ishikawa M. An optimal design methodology for the trajectory of hydraulic excavators based on genetic algorithm. *Journal of Robotics and Mechatronics*. 2021;33:1248-1254. DOI: 10.20965/jrm.2021.p1248
9. Li Y., Mu X., Fan R. Multi-objective optimization and simulation of novel working mechanism for face-shovel excavator. *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*. 2021;5(1):1-9. DOI: 10.1007/s41315-020-00160-1
10. Zhuravlev A.G., Chernykh V.V. Technical and economic calculations of the use of loaders as excavation and transportation equipment of open pits. *Problemy nedropol'zovaniya* [Problems of Subsurface Use]. 2021;(1):45-55. (In Russ.)
11. Ivanov V.V., Dzyurich D.O. Justification of the technological scheme parameters for the development of flooded deposits of construction sand. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of the Mining Institute]. 2022. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.3> (In Russ.)
12. Loginov E.V., Tyuleneva T.A. Control of quarry parameters to improve the efficiency of hydraulic backhoes. *Ugol* [Coal]. 2022;(12):6-10. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-12-6-10
13. Fomin S.I., Ivanov V.V., Semenov A.S., Ovsyannikov M.P. Incremental open-pit mining of steeply dipping ore deposits. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2020;11(15):1306-1311.
14. Ligotskiy D.N., Fomin S.I. *Tekhnologiya razrabotki mestorozhdenii stroitelnykh materialov: ucheb. posobie* [Technology of development of deposits of building materials: study guide]. Saint Petersburg: Saint Petersburg Mining University; 2011. 91 p. (In Russ.)
15. Argimbaev K.R., Ligotskiy D.N. *Otkrytaya razrabotka mestorozhdenii stroitelnykh materialov: ucheb. posobie* [Open development of deposits of building materials: study guide]. Saint Petersburg: Lan; 2022. 104 p. (In Russ.)
16. Repin N.Ya., Repin L.N. *Vyemochno-pogruzochnye raboty: ucheb. posobie* [Extraction and loading operations: study guide]. Moscow: Gornaya kniga; 2012. 272 p. (In Russ.)
17. Arsentev A.I. *Razrabotka mestorozhdenii tverdykh poleznykh iskopaemykh otkrytym sposobom* [Open-pit mining of solid mineral deposits]. Saint Petersburg: Saint Petersburg Mining University; 2010. 115 p. (In Russ.)
18. Anistratov Yu.I. *Tekhnologiya otkrytykh gornykh rabot* [Open-pit mining technology]. Moscow: LLC Mining Research and Technical Center; 2008. 472 p. (In Russ.)
19. Trubetskoy K.N., Potapov M.G., Vinitskii K.E., Melnikov N.N. et al. *Otkrytye gornye raboty: spravochnik* [Open-pit mining: Guide]. Moscow: Gornoe byuro; 1994. 590 p. (In Russ.)
20. Drebenstedt C., Argimbaev K.R. Korkinsk brown coal open pit as a case study of endogenous fires. *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*. 2021;34(1):292-304.

Поступила 09.11.2022; принята к публикации 16.12.2022; опубликована 27.03.2023
Submitted 09/11/2022; revised 16/12/2022; published 27/03/2023

Логинов Егор Вячеславович – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Разработка месторождений полезных ископаемых», Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия. Email: loginov_ev@pers.spmi.ru. ORCID 0000-0003-3965-0839

Масальский Сергей Сергеевич – студент кафедры «Разработка месторождений полезных ископаемых», Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия. Email: 433ckacl750@gmail.com.

Egor V. Loginov – PhD (Eng.), Senior Lecturer, the Department of Development of Mineral Deposits, Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia. Email: loginov_ev@pers.spmi.ru. ORCID 0000-0003-3965-0839

Sergey S. Masalskiy – student the Department of Development of Mineral Deposits, Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia. Email: 433ckacl750@gmail.com.

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

УДК 622.271

DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-1-24-31



КОМБИНИРОВАННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ СЛОЖНОСТРУКТУРНЫХ ГЛУБОКОЗАЛЕГАЮЩИХ РОССЫПЕЙ ЗОЛОТА

Чебан А.Ю., Секисов А.Г.

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

Аннотация. Актуальность и цель исследования. Россыпные месторождения золота преимущественно имеют сложную структуру с значительной изменчивостью содержания полезного компонента и крупности золотин в песках продуктивного пласта, в связи с чем их разработка с применением традиционных технологий переработки, ориентированных на преимущественно гравобогатимое золото с крупностью более 0,5 мм, приводит к большим потерям металла. Известные технологии разработки глубокозалегающих россыпей не ориентированы на селективную выемку песков с различным уровнем содержания и крупностью золота, поэтому не обеспечивают возможности гибкого изменения технологических схем, режимов и параметров переработки разнокачественной минеральной массы. Необходимым условием применения селективной выемки песков и их отдельной переработки является выявление точных контуров богатых зон с золотом повышенной крупности для их опережающей выемки. **Цель работы.** Совершенствование технологии комбинированной разработки сложноструктурных россыпных месторождений золота путем оконтуривания зон богатых песков, подбора комплекса оборудования для обеспечения их качественной опережающей выемки, отработки зон рядовых и бедных песков с применением технологии скважинного выщелачивания. **Результаты.** В статье предлагается усовершенствованная технология разработки, заключающаяся в выявлении зон богатых песков с последующим уточнением их контуров, опережающей механической выемки богатых песков, содержащих существенное количество относительно крупного золота, посредством выемочного модуля, с доработкой оставшейся части богатых песков с применением скважинной гидродобычи, а рядовых и бедных участков – с использованием скважинного выщелачивания. Выемочный модуль устанавливается на штангу буровой установки и включает в себя режущие элементы, тяги, гидропривод, бадью. Извлеченные на поверхность богатые пески направляются на многостадийное обогащение. Оставшийся основной объем залежи обрабатывается с применением скважинного выщелачивания растворами с адаптивными концентрациями, обеспечивающими относительно высокое извлечение золота в продуктивный раствор. **Выводы.** Применение предлагаемой комбинированной технологии позволит существенно сократить технологические потери и увеличить извлечение металла из песков сложноструктурных глубокозалегающих россыпей при одновременном снижении удельной себестоимости добычи золота.

Ключевые слова: продуктивный пласт, богатые пески, гравобогатимое золото, «тонкое» золото, выемочный модуль, механическая выемка, скважинная гидродобыча, скважинное выщелачивание

© Чебан А.Ю., Секисов А.Г., 2023

Для цитирования

Чебан А.Ю., Секисов А.Г. Комбинированная технология разработки сложноструктурных глубокозалегающих россыпей золота // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №1. С. 24-31. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-24-31>



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

COMBINED TECHNOLOGY FOR THE DEVELOPMENT OF COMPLEX STRUCTURE DEEP GOLD PLACERS

Cheban A.Yu., Sekisov A.G.

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

Abstract. Problem Statement (Relevance). Alluvial gold deposits mainly have a complex structure with a significant variability in the content of the useful component and the size of gold grains in sands of the producing formation, and, therefore, their development, using conventional processing technologies focused predominantly on gold recovered by gravity with a size of over 0.5 mm, leads to large losses of gold. The known technologies for the development of deep-seated placers are not focused on the selective extraction of sands with different levels of gold content and size; therefore, they do not provide the possibility of flexible changes in process flow charts, modes and parameters of processing the mineral mass, which is not uniform in its quality. A necessary condition for the use of the selective extraction of sands and their separate processing is the identification of the exact contours of rich zones, containing gold of a higher size, for their prior extraction. **Objective.** The research is aimed at improving the technology for the combined development of complex-structural alluvial gold deposits by delineating rich sand zones, selecting a set of equipment to ensure their high-quality prior extraction, mining of ordinary and poor sand zones using in-situ leaching technology. **Results.** The paper proposes an improved development technology, which consists in identifying zones of rich sands and subsequent refinement of their contours, prior mechanical extraction of rich sands, containing a significant amount of relatively coarse gold using an extraction module, with the extraction of the rest of the rich sands using hydraulic borehole mining, and ordinary and poor areas using in-situ leaching. The extraction module is installed on the stem of the drilling rig and includes cutting elements, rods, a hydraulic drive, and a bucket. The rich sands extracted to the surface are supplied for multi-stage enrichment. The remaining main volume of the deposit is mined using in-situ leaching solutions with adaptive concentrations that provide a relatively high recovery of gold into the product solution. **Conclusions.** The use of the proposed combined technology will significantly reduce technological losses and increase the extraction of gold from the sands of complex-structured deep-seated placers, while reducing the unit cost of gold mining.

Keywords: producing formation, rich sands, gold recovered by gravity, fine-grained gold, extraction module, mechanical extraction, hydraulic borehole mining, in-situ leaching

For citation

Cheban A.Yu., Sekisov A.G. Combined Technology for the Development of Complex Structure Deep Gold Placers. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 1, pp. 24-31. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-24-31>

Введение

Освоение россыпных месторождений золота в сравнении с рудными требует значительно меньших капитальных и эксплуатационных затрат на добычу и переработку минерального сырья, в связи с чем в отработку могут вовлекаться пески, содержание золота в которых в несколько раз меньше, чем в рудах [1-4]. Несмотря на существенный рост объемов добычи золота из рудных месторождений, в России в 2018-2021 гг. на россыпных месторождениях добывалось около 26-29% металла, при этом в таких крупных золотодобывающих регионах, как Магаданская и Амурская области, республика Саха (Якутия), доля россыпного золота в общей добыче существенно превышала 30% [5]. По причине истощения минерально-сырьевой базы россыпных месторождений золота недропользователи вы-

нуждены работать во все более сложных горно-геологических и горнотехнических условиях, заключающихся в увеличении глубины залегания продуктивных пластов и усложнении их границ, а также уменьшении содержания и крупности золота в песках [6-8]. В настоящее время в связи с применением все более мощного горнодобывающего оборудования и комплексной механизации производственных процессов глубина открытой разработки россыпей постепенно возрастает, что предопределяет значительное увеличение объема вскрышных работ и оказывает существенное отрицательное влияние на окружающую среду [9-12].

Состояние вопроса и постановка проблемы

Перспективы роста добычи россыпного золота в значительной степени связаны с освоением запасов глубокозалегающих россыпей, разра-

ботка которых ведется подземным способом, а также с применением скважинного выщелачивания или скважинной гидродобычи. Реализация подземного способа добычи требует больших капитальных вложений и целесообразна при освоении богатых песков, залегающих в благоприятных для подземной разработки условиях. Необходимо отметить, что в отдельных, особо богатых зонах продуктивного пласта содержание золота может достигать от нескольких десятков до нескольких сотен г/м³ [13, 14]. Однако нужно учитывать, что для россыпей характерна неоднородность горно-геологических условий отработки: значительное изменение мощности продуктивного пласта и содержания металла; усложнение морфологии пласта; уменьшение крупности золотин и связанный с этим рост потерь металла при промывке; увеличение объемов перерабатываемой горной массы на единицу извлекаемого металла. В связи с этим подземным способом осуществляется разработка преимущественно песков с высоким содержанием полезного компонента из достаточно мощных продуктивных пластов, в то же время извлекать таким способом пески, имеющие рядовые и низкие содержания золота, малоэффективно и экономически нецелесообразно.

Уменьшить эксплуатационные и капитальные затраты, обеспечить возможность рентабельной отработки небольших глубокозалегающих россыпей или их отдельных участков позволяют технологии скважинной добычи. Технология скважинной гидродобычи включает вскрытие продуктивного пласта гидромониторными и гидроэлеваторными скважинами, гидроразрыв и подъем песков в виде пульпы через скважины на дневную поверхность и далее к промывочному прибору [12, 15]. Недостатком скважинной гидродобычи являются существенные технологические потери металла в недрах, при этом потери существенно возрастают в случае наличия в песках большого количества крупного золота и самородков, которые не в полной мере поднимаются гидропотоком. В ряде случаев при разработке россыпей, запасы которых в значительной степени представлены мелким, «тонким» и дисперсным золотом, применение традиционных технологий является нерентабельным по причине больших потерь металла при промывке [16-18]. Перспективным направлением освоения подобных россыпей является применение технологии скважинного выщелачивания, включающей бурение закачных и откачных скважин, подачу раствора в продуктивный пласт, вы-

щелачивание металла, содержащегося в песках, откачку и переработку продуктивного раствора [17]. Существенным недостатком скважинного выщелачивания является неполное растворение крупных золотин размером более 1-1,5 мм, а также золотин невысокой пробы (менее 0,800).

Повышения эффективности разработки глубокозалегающих сложноструктурных россыпей за счет сокращения трудоемкости и себестоимости работ, а также повышения извлечения металла из недр возможно достичь путем применения комбинированных технологий. Так, в работе [10] предлагается способ освоения россыпей, позволяющий снизить объем перемещаемой горной массы, заключающийся во вскрытии продуктивного пласта разрезной траншеей с размещением в ней гидроэлеватора и пульпопровода, а также в проходке установкой направленного горизонтального бурения пионерной скважины с поверхности через продуктивный пласт к дну разрезной траншеи. После расширения скважины посредством обратного бурения в ней размещается гидромонитор и трубопровод для подачи воды с дневной поверхности. Размытые гидромонитором при отступающей выемке пески продуктивного пласта в потоке пульпы стекают по днищу формируемой выработки в зумпф, расположенный в разрезной траншее, откуда пульпа гидроэлеватором транспортируется по пульпопроводу на поверхность к промывочным приборам. Известны комбинированные технологии отработки россыпей, совмещающие скважинную гидродобычу и скважинное выщелачивание [15, 19], при этом скважинному выщелачиванию подвергаются участки продуктивного пласта с песками, содержащими преимущественно мелкое, «тонкое» и дисперсное золото, а посредством скважинной гидродобычи ведется подъем песков, содержащих преимущественно гравобогащаемое золото. Недостатком способов [10, 15, 19] являются существенные потери металла при гидроразрыве и подъеме богатых песков, содержащих крупное золото и самородки.

Необходимо отметить, что в связи с неравномерностью сосредоточения запасов сложноструктурных пластов в относительно небольших объемах песков может находиться существенная часть золота. Так, исследования [12] показали, что на одном из участков Куранахского золото-россыпного месторождения в 1,9% объема песков содержится 19% металла. В связи с этим может быть целесообразной опережающая локальная механическая выемка наиболее богатых песков. В работе [20] предлагается способ разра-

ботки россыпей, заключающийся в расширении шнеком на всю глубину скважин, выявивших в ходе эксплуатационной разведки зоны богатых песков, содержащих крупное самородное золото, с последующим дополнительным расширением данных скважин специальным цилиндрическим ковшом на уровне залегания продуктивного пласта с локальной выемкой богатых песков, их подъемом на поверхность и подачей на промывку, а также отработку оставшихся песков продуктивного пласта с применением технологии скважинного выщелачивания. Недостатками данной технологии являются отсутствие уточненных данных по контурам зон богатых песков, оставление существенной части богатых песков в недрах, невозможность вести выемку богатых песков из неровностей и трещин плотика, существенные потери металла из-за неполного растворения относительно крупных золотинок, содержащихся в рядовых песках и оставшейся в недрах части богатых песков.

Целью данного исследования является совершенствование технологии комбинированной раз-

работки сложноструктурных глубокозалегающих россыпных месторождений золота путем уточнения контуров зон богатых песков, подбора комплекса оборудования для обеспечения их качественной опережающей выемки, отработки зон рядовых и бедных песков с применением технологии скважинного выщелачивания растворами с адаптивными концентрациями, обеспечивающими относительно высокое извлечение золота.

Результаты исследования

В Институте горного дела ДВО РАН разработана комбинированная технология освоения сложноструктурных глубокозалегающих россыпей, обеспечивающая повышение точности оконтуривания и увеличение полноты извлечения золота из недр. В ходе эксплуатационной разведки глубокозалегающего продуктивного пласта 1 осуществляется бурение разведочных скважин с заглублением в плотик с выявлением зон богатых, рядовых и бедных песков (рис. 1).

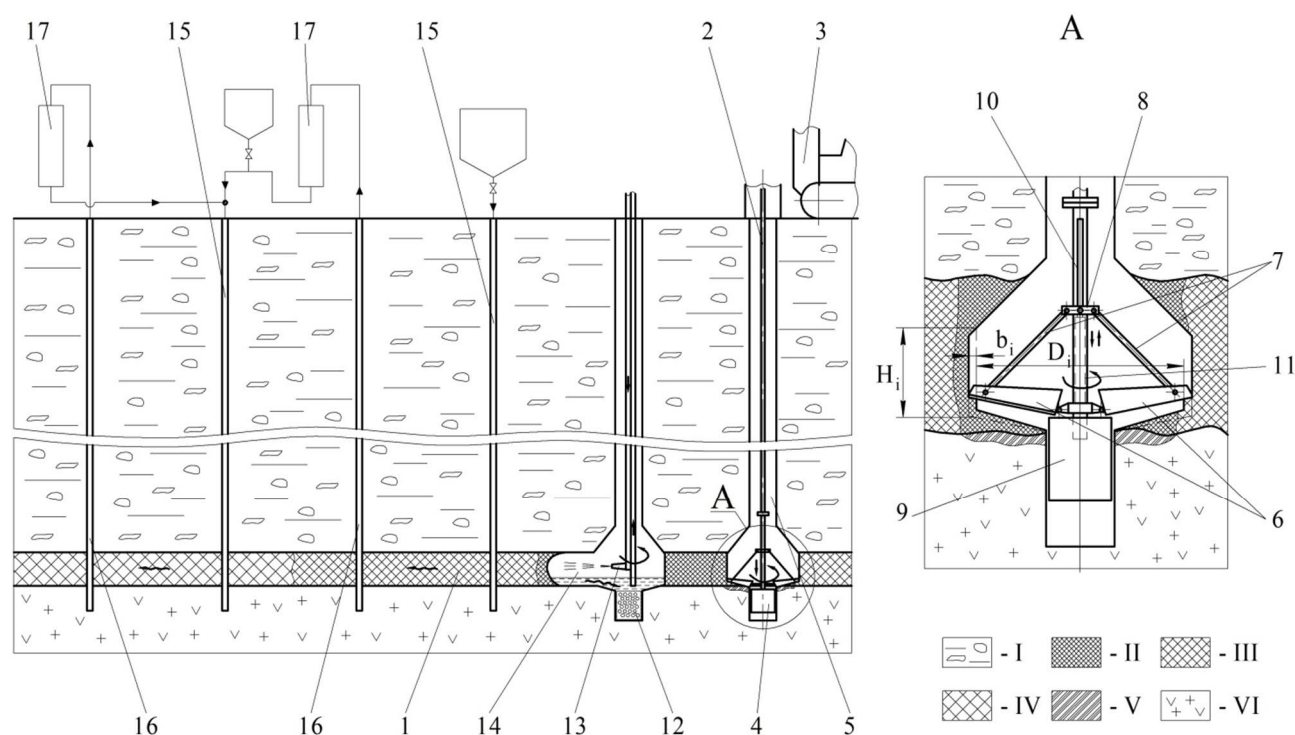


Рис. 1. Схема комбинированной разработки сложноструктурных глубокозалегающих россыпей:

I – торф; II, III, IV – зоны соответственно богатых, рядовых и бедных песков; V – обогащенная зона с рудным золотом в плотике; VI – плотик

Fig. 1. Process flow chart of combined development for complex structure deep-seated placers: I is peat; II, III, IV are zones of rich, ordinary and poor sands, respectively; V is an enriched zone with ore gold in the bedrock; VI is a bedrock

При выявлении богатых песков, существенная часть металла в которых представлена относительно крупными золоти́нами размером более 1,5-2 мм, осуществляется вторая стадия разведки со сгущением сети скважин и уточнением контуров зон богатых песков. Опережающая выемка богатых песков с относительно крупным самородным золотом ведется механическим способом путем первичного расширения разведочной скважины на всю глубину с применением шнека большого диаметра (на **рис. 1** не показан). После чего шнек на штанге 2 буровой установки 3 заменяется на дистанционно управляемый выемочный модуль 4, осуществляющий повторное расширение скважины 5 на горизонте продуктивного пласта 1. Выемочный модуль 4 включает режущие элементы 6 с тягами 7 и подвижной втулкой 8, бадью 9, а также пустотелую направляющую 10, внутри которой размещен гидроцилиндр 11. При погружении или подъеме выемочного модуля 4 гидроцилиндр 11 полностью выдвинут, подвижная втулка 8 поднята в крайнее верхнее положение, а тяги 7 и режущие элементы 6 вытянуты вдоль пустотелой направляющей 10. После достижения выемочным модулем 4 горизонта продуктивного пласта 1 гидроцилиндр 11 частично втягивается, подвижная втулка 8 начинает опускаться, при этом режущие элементы 6 посредством тяг 7 начинают поворачиваться, одновременно осуществляется вращение выемочного модуля 4 на штанге 2 с его медленным погружением. Повторное расширение скважины 5 производится тонкими вертикальными слоями, толщина которых определяется из условия заполнения бадьи 9 при перемещении выемочного модуля 4 в пределах мощности продуктивного пласта 1:

$$b_i = \frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{4V_B}{\pi H_i K_p} + D_i^2} - D_i \right),$$

где V_B – объем бадьи, м³; H_i – высота участка повторно расширяемой скважины с учетом геометрии перемещения режущих элементов, м; D_i – текущий диаметр повторно расширяемой скважины, м; K_p – коэффициент разрыхления песков.

Поднимаемые в бадье на поверхность богатые пески контролируются по содержанию и крупности полезного компонента. Повторное расширение скважины продолжается до сниже-

ния качества извлекаемой минеральной массы до установленного уровня. Производительность буровой установки, м³/ч, по извлечению богатых песков при расширении скважин определяется по формуле

$$\Pi = \frac{60V_B K_n K_b}{(t_{oi} + t_{повi} + t_p + t_{пи} + t_b) K_p},$$

где K_n – коэффициент наполнения бадьи; K_b – коэффициент использования буровой установки по времени; t_{oi} , $t_{пи}$ – соответственно время опускания и подъема выемочного модуля в зависимости от глубины нахождения продуктивного пласта, мин; $t_{повi}$ – время поворота режущих элементов в рабочее и транспортное положение в зависимости от величины расширения скважины, мин; t_p – время резания песков до заполнения бадьи, мин; t_b – время выгрузки песка из бадьи, мин.

Для осуществления механической выемки песков можно использовать буровые установки типа Bauer. Так, установка Bauer MBG-12 при массе 34,5 т имеет максимальный диаметр бурения шнеком 1,3 м на глубину до 36 м, данное оборудование с 2006 года выпускается в г. Кургане. Предварительные расчеты показывают, что производительность буровой установки Bauer MBG-12, оснащенной выемочным модулем предлагаемой конструкции, при разработке продуктивного пласта, залегающего на глубине 35 м, составит 18-20 м³/ч. После выемки богатых песков производится отработка обогащенной зоны с рудным золотом в плотике, поднятая горная масса направляется обогащению с извлечением золота гравитационным или флотогравитационным способом.

Для выемки оставшихся богатых песков в ранее сформированных полостях размещают коллекторы 12 с перфорированными стенками, а также погружные гидромониторы 13 и водными струями перемещают минеральную массу богатых песков с осаждением и накоплением внутри коллекторов 12 крупнозернистого золота и шлиховых материалов. Коллекторы 12 периодически поднимают на поверхность для извлечения крупнозернистого золота. Добытые механическим и гидравлическим способом богатые пески направляются на многостадийное обогащение, обеспечивающее наиболее полное извлечение гравобогащаемого золота, при этом хвосты обогащения, содержащие

недоизвлеченное «тонкое» и дисперсное золото, подаются в сформированные полости 14 пласта песков для последующего выщелачивания и закладки выработанного пространства.

После опережающей выемки обогащенных участков россыпи осуществляется подготовка оставшейся части залежи к скважинному выщелачиванию путем вскрытия продуктивного пласта песков закачными 15 и откачными 16 скважинами. Для повышения эффективности скважинного выщелачивания при отработке участков рядовых песков, содержащих преимущественно средне-размерное и мелкое золото, через закачные скважины подается активированный гипохлоритно-хлоридный раствор с повышенной концентрацией комплексообразователей для золота [17]. Продуктивный раствор, поднятый через откачные скважины на дневную поверхность, подается к сорбционным колоннам 17. Исследования по выщелачиванию золотосодержащих песков активированными растворами, проведенные авторами, показали возможность существенного повышения извлечения металла (на 17-20%) за счет интенсивного окисления минеральных матриц магнетита и пирита, содержащих инкапсулированное и дисперсное золото (рис. 2).

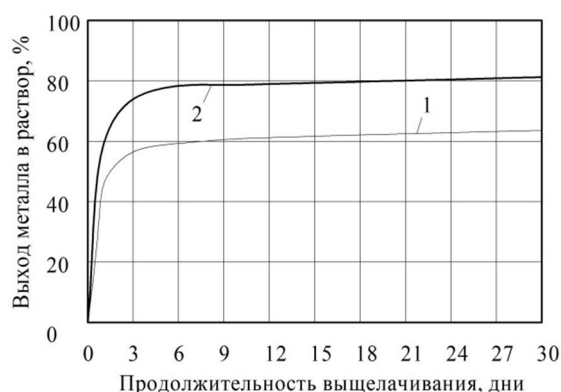


Рис. 2. Графики зависимости извлечения золота из песков в продуктивный раствор от продолжительности выщелачивания: 1 – хлоридный раствор; 2 – гипохлоритно-хлоридный раствор, полученный в электрофотохимическом реакторе

Fig. 2. Dependence diagrams of gold extraction from sands into a product solution and the duration of leaching: 1 is a chloride solution; 2 is a hypochlorite-chloride solution produced in an electrophotochemical reactor

Для выщелачивания участков бедных песков, содержащих преимущественно мелкое, «тонкое» и дисперсное золото, предлагается использовать маточный раствор, реактивированный и доукрепленный комплексообразователем.

Выводы

Авторами предложена технология комбинированной разработки сложноструктурных глубокозалегающих россыпей с опережающей выемкой богатых песков. Механическая выемка основного объема богатых песков, содержащих относительно крупное самородное золото с применением бурового агрегата, оборудованного выемочным модулем, позволит существенно сократить потери металла в сравнении с полностью скважинной гидродобычей. Конструкция выемочного модуля дает возможность существенно расширять диаметр скважин и проводить выемку как песков продуктивного пласта, так и обогащенной рудной зоны плотика. Наличие скважин, оставшихся после механической выемки, позволит существенно уменьшить расходы для организации последующей скважинной гидродобычи оставшихся объемов богатых песков. Поднятые на поверхность богатые пески направляются на дорогостоящее многостадийное обогащение, обеспечивающее максимальное извлечение металла из относительно небольшого объема песков. Основной объем залежи, представленный рядовыми и бедными песками, имеющими существенно меньшее содержание металла, представленного, кроме того, меньшими классами крупности золотин, отрабатывается с применением скважинного выщелачивания растворами с адаптивными концентрациями, обеспечивающими относительно высокое извлечение золота в продуктивный раствор. Сравнительные экспериментальные исследования по выщелачиванию золота песков россыпей показали существенное повышение извлечения металла при использовании активированного раствора в сравнении традиционным. Проведенные укрупненные расчеты применительно к одной из сложноструктурных глубокозалегающих россыпей показали, что применение предлагаемой комбинированной технологии позволит увеличить извлечение металла из песков сложноструктурной россыпи на 12-15% при снижении удельной себестоимости добычи золота на 4-5%.

Список источников

1. Oberthuer T., Melcher F., Weiser T. W. Detrital platinum-group minerals and gold in placers of southeastern Samar Island, Philippines // The Canadian Mineralogist. 2017, vol. 55, no. 1, pp. 45-62.
2. Дорош Е.А., Тальгамер Б.Л. Обоснование рациональных способов вовлечения в разработку отвалов россыпной золотодобычи // Вестник Магнито-

- горского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №3. С. 64-76.
3. Verbrugge B., Geenen S. The gold commodity frontier: A fresh perspective on change and diversity in the global gold mining economy // *The Extractive Industries and Society*. 2019, vol. 6, no. 2, pp. 413-423.
 4. Васильева С.В., Секисов А.Г. Экономика отраслевых рынков. Чита: Изд-во ЧитГУ, 2011. 124 с.
 5. Башмачников А. Производство золота в России – итоги 2021 года // *Золото и технологии*. 2022. №2. С. 18-29.
 6. Holley E. A., Yu Ting Yu, Navarre-Sitchler A., Winterton J. Quantitative mineralogy and geochemistry of pelletized sulfide-bearing gold concentrates in an alkaline heap leach. *Hydrometallurgy*. 2018, vol. 181, pp. 130-142.
 7. Чебан А.Ю., Рассказов И.Ю., Литвинцев В.С. Анализ парка горных машин горнодобывающих предприятий Амурской области // *Маркшейдерия и недропользование*. 2012. №2. С. 41-50.
 8. Хрунина Н.П. Совершенствование комплекса средств для переработки высокоглинистых золотосодержащих россыпей // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2021. Т.19. №2. С. 14-22.
 9. Анализ экономической эффективности добычи золота на россыпных месторождениях способами бульдозерно-скреперным и подземного скважинного выщелачивания / Рогов Е.И., Жатканбаев Е.Е., Жатканбаева Ж.К., Болатова А.Б., Нурымов Ж.Д. // *Вестник Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева*. 2020. №3. С. 32-38.
 10. Багазеев В.К., Валиев Н.Г., Старцев В.А. Разработка россыпей направленным бурением скважин // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2019. №3. С. 135-144.
 11. Рассказов И.Ю., Чебан А.Ю., Литвинцев В.С. Анализ технической оснащенности горнодобывающих предприятий Хабаровского края и Еврейской автономной области // *Горный журнал*. 2013. №2. С. 30-34.
 12. Ermakov S.A. and Burakov A.M. Complex-structure gold placer mining in Yakutia // *Journal of Mining Science*. 2013, vol. 49, no. 2, pp. 273-278.
 13. Рукович А.В., Рочев В.Ф. Использование метода скважинной гидродобычи на россыпных месторождениях золотая Южной Якутии // *Успехи современного естествознания*. 2017. №10. С. 101-106.
 14. Qiao Chen, Hong-ying Yang, Lin-lin Tong, Hui-qun Niu, Fu-sheng Zhang et al. Research and application of a Knelson concentrator: A review // *Minerals Engineering*. 2020, vol. 152, 106339.
 15. Опыт разработки погребенных многолетнемерзлых россыпей золота скважинной гидродобычей / Аренис В.Ж., Фазлулин М.И., Хрулев А.С., Хчян Г.Х. // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019. №1. С. 26-35.
 16. Ghaffari A., Farzanegan A. An investigation on laboratory Knelson Concentrator separation performance: Part 1: Retained mass modelling // *Minerals Engineering*. 2017, vol. 112, pp. 57-67.
 17. Sekisov A., Rasskazova A. Assessment of the possibility of hydrometallurgical processing of low-grade ores in the oxidation zone of the Malmyzh Cu-Au porphyry deposit // *Minerals*. 2021, vol. 11, no. 1, pp. 1-11.
 18. Алексеев В.С., Серый Р.С., Соболев А.А. Повышение извлечения мелкого золота на промывочном приборе шлюзового типа // *Обогащение руд*. 2019. №5. С. 13-18.
 19. Пат. 2740647 Российская Федерация, МПК E21B 43/28. Способ разработки россыпных месторождений с использованием скважинного выщелачивания / А.Г. Секисов, А.Ю. Чебан, А.В. Рассказова, К.В. Гевало; заявитель и патентообладатель Хабаровский Дальневосточный исследовательский центр ДВО РАН. № 2020119013; заявл. 02.06.2020; опубл. 19.01.2021.
 20. Пат. 2774167 Российская Федерация, МПК E21C 41/28. Способ разработки сложноструктурных глубоководных россыпей / А.Ю. Чебан, А.Г. Секисов, Н.П. Хрунина; заявитель и патентообладатель Хабаровский Дальневосточный исследовательский центр ДВО РАН. № 202112388; заявл. 09.08.2021; опубл. 15.06.2022.

References

1. Oberthuer T., Melcher F., Weiser T.W. Detrital platinum-group minerals and gold in placers of southeastern Samar Island, Philippines. *The Canadian Mineralogist*. 2017;55(1):45-62.
2. Dorosh E.A., Talgamer B.L. Rationale for feasible ways of involving dumps of placer gold mining in the development. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022;20(3):64-76. (In Russ.)
3. Verbrugge B., Geenen S. The gold commodity frontier: A fresh perspective on change and diversity in the global gold mining economy. *The Extractive Industries and Society*. 2019;6(2):413-423.
4. Vasileva S.V., Sekisov A.G. *Ekonomika otraslevykh rynkov* [Economy of branch markets]. Chita: Chita State University; 2011. 124 p. (In Russ.)
5. Bashmachnikov A. Gold production in Russia - the results of 2021. *Zoloto i tekhnologii* [Gold and Technologies]. 2022;(2):18-29. (In Russ.)
6. Holley E.A., Yu Ting Yu, Navarre-Sitchler A., Winterton J. Quantitative mineralogy and geochemistry of pelletized sulfide-bearing gold concentrates in an alkaline heap leach. *Hydrometallurgy*. 2018;181:130-142.
7. Cheban A.Yu., Rasskazov I.Yu., Litvintsev V.S. Analysis of the pool of mining machines at mining enterprises in the Amur Region. *Marksheideriya i nedropolzovanie* [Mine Surveying and Subsoil Use]. 2012;(2):41-50. (In Russ.)

8. Khrunina N.P. Improving the complex of means for the processing of high-clay gold-bearing sands of placers. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021;19(2):14-22. (In Russ.)
9. Rogov E.I., Zhatkanbaev E.E., Zhatkanbaeva Zh.K., Bolatova A.B., Nuryimov Zh.D. Analysis of the economic efficiency of gold mining at alluvial deposits using bulldozer-scraper and in-situ leaching methods. *Vestnik Vostochno-Kazakhstanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. D. Serikbaeva* [Bulletin of Serikbaev East Kazakhstan State Technical University]. 2020;(3):32-38. (In Russ.)
10. Bagazeev V.K., Valiev N.G., Startsev V.A. Development of placers by directional drilling of wells. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle* [Proceedings of Tula State University. Series: Earth Sciences]. 2019;(3):135-144. (In Russ.)
11. Rasskazov I.Yu., Cheban A.Yu., Litvintsev V.S. Analysis of the technical equipment of mining enterprises in the Khabarovsk Territory and the Jewish Autonomous Region. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal]. 2013;(2):30-34. (In Russ.)
12. Ermakov S.A., Burakov A.M. Complex-structure gold placer mining in Yakutia. *Journal of Mining Science*. 2013;49(2):273-278.
13. Rukovich A.V., Rochev V.F. Using the method of hydraulic borehole mining for placer gold deposits in southern Yakutia. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Advances in Current Natural Sciences]. 2017;(10):101-106. (In Russ.)
14. Qiao Chen, Hong-ying Yang, Lin-lin Tong, Hui-qun Niu, Fu-sheng Zhang et al. Research and application of a Knelson concentrator: A review. *Minerals Engineering*. 2020;152:106339.
15. Arens V.Zh., Fazlulin M.I., Khrulev A.S., Khcheyan G.Kh. Experience of hydraulic borehole mining of gold placers buried in permafrost. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin]. 2019;(1):26-35. (In Russ.)
16. Ghaffari A., Farzanegan A. An investigation on laboratory Knelson Concentrator separation performance: Part 1: Retained mass modeling. *Minerals Engineering*. 2017;112:57-67.
17. Sekisov A., Rasskazova A. Assessment of the possibility of hydrometallurgical processing of low-grade ores in the oxidation zone of the Malmyzh Cu-Au porphyry deposit. *Minerals*. 2021;11(1):1-11.
18. Alekseev V.S., Seryi R.S., Sobolev A.A. Increasing the extraction of fine gold on a sluice-type flushing device. *Obogashchenie rud* [Ore Dressing]. 2019;(5):13-18. (In Russ.)
19. Sekisov A.G., Cheban A.Yu., Rasskazova A.V., Gevalo K.V. A method for the development of alluvial deposits using in-situ leaching. RU2740647 (Patent) 2021.
20. Cheban A.Yu., Sekisov A.G., Khrunina N.P. A method for the development of complex structural deep-seated placers. RU2774167 (Patent) 2022.

Поступила 08.11.2022; принята к публикации 13.12.2022; опубликована 27.03.2023
Submitted 08/11/2022; revised 13/12/2022; published 27/03/2023

Чебан Антон Юрьевич – ведущий научный сотрудник, Институт горного дела Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИГД ХФИЦ ДВО РАН), Хабаровск, Россия. Email: chebanay@mail.ru.

Секисов Артур Геннадиевич – главный научный сотрудник, Институт горного дела Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИГД ХФИЦ ДВО РАН), Хабаровск, Россия. Email: sekisovag@mail.ru.

Anton Yu. Cheban – Lead Researcher, Mining Institute of the Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (MI KhFRC FEB RAS), Khabarovsk, Russia. Email: chebanay@mail.ru.

Artur G. Sekisov – Chief Researcher, Mining Institute of the Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (MI KhFRC FEB RAS), Khabarovsk, Russia. Email: sekisovag@mail.ru.

ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ
MATERIAL PROCESS ENGINEERING

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

УДК 621.789:538.911

DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-1-32-44

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
И МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ СПЛАВА АК5М2,
ПОВЕРХНОСТНО МОДИФИЦИРОВАННОГО ТИТАНОМСеребрякова А.А.¹, Загуляев Д.В.¹, Шляров В.В.¹, Шлярова Ю.А.¹, Иванов Ю.Ф.², Устинов А.М.³¹ Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия² Институт сильноточной электроники Сибирское отделение Российской академии наук, Томск, Россия³ Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия

Аннотация. Актуальность работы. Применение модифицирования металлов и сплавов методами внешних энергетических воздействий позволяет локально упрочнить поверхностный слой деталей и узлов, изготавливаемых из алюминиевых сплавов. **Цель работы.** Выявление закономерностей влияния режимов электронно-пучковой обработки на механические характеристики и морфологию поверхности разрушения сплава АК5М2, поверхностно модифицированного титаном. **Используемые методы.** Применены современные методы физического материаловедения. Выполнено поверхностное модифицирование сплава АК5М2 пленкой Ti вакуумно-дуговым методом. Модифицированные образцы сплава АК5М2 облучались интенсивным импульсным электронным пучком при режимах, отличающихся плотностью энергии пучка электронов (от 10 до 50 Дж/см²). Механические испытания проведены путем одноосного растяжения до разрушения образцов сплава в исходном состоянии, модифицированных образцов до и после облучения по 5-ти режимам. Методами сканирующей электронной микроскопии проведен фрактографический анализ поверхности разрушения образцов, полученных в результате растяжения. **Новизна.** Разработка уникального способа модификации сплава АК5М2 позволяет улучшить его прочностные и морфологические свойства по сравнению с материалом в исходном состоянии. **Результаты.** В результате механических испытаний установлены значения предела текучести, временного сопротивления, относительного остаточного удлинения и сужения при разрыве. Установлена зависимость изменения деформационных характеристик и структуры поверхности разрушения от режимов ЭПО. На основании проведенных испытаний образцов сплава АК5М2, поверхностно модифицированного титаном, выявлен режим электронно-пучковой обработки, приводящий к формированию в поверхностном слое структуры, характеризующейся повышенными механическими свойствами. **Практическая значимость.** Поверхностное модифицирование титаном сплава АК5М2 после электронно-пучковой обработки при режиме с применением плотности энергии пучка электронов 30 Дж/см² приводит к повышению прочностных характеристик. Параметры данного режима можно использовать для локального упрочнения деталей, изготовленных из данного сплава, например втулочных подшипников.

Ключевые слова: модификация сплавов, электронно-пучковая обработка, вакуумно-дуговой метод, механические характеристики АК5М2, фрактография

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-79-10059, <https://rscf.ru/project/19-79-10059/>.

Исследование выполнено с использованием оборудования ЦКП «Материаловедение» ФГБОУ ВО «СибГИУ».

© Серебрякова А.А., Загуляев Д.В., Шляров В.В., Шлярова Ю.А., Иванов Ю.Ф., Устинов А.М., 2023

Для цитирования

Исследование механических характеристик и морфологии поверхности разрушения сплава АК5М2, поверхностно модифицированного титаном / Серебрякова А.А., Загуляев Д.В., Шляров В.В., Шлярова Ю.А., Иванов Ю.Ф., Устинов А.М. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №1. С. 32-44. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-32-44>



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

STUDY ON MECHANICAL CHARACTERISTICS AND FRACTURE SURFACE MORPHOLOGY OF THE Ti SURFACE-MODIFIED AK5M2 ALLOY

Serebryakova A.A.¹, Zaguliaev D.V.¹, Shlyarov V.V.¹, Shliarova Yu.A.¹, Ivanov Yu.F.², Ustinov A.M.³

¹ Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

² Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia

³ Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The modification of metals and alloys by the external energy deposition methods makes it possible to locally strengthen the surface layer of parts and assemblies made of aluminum alloys. **Objective.** This study is aimed at revealing the regularities of the effect of electron beam processing modes on the mechanical characteristics and fracture surface morphology of the Ti surface-modified AK5M2 alloy. **Methods Applied.** The authors used the methods of modern physical materials science. The surface of the AK5M2 alloy was modified with a Ti film by the vacuum arc method. The modified samples of the AK5M2 alloy were irradiated with an intense pulse electron beam in modes differing in the energy density of the electron beam (from 10 to 50 J/cm²). Mechanical tests were carried out by uniaxial tension to fracture of the alloy samples in the original state, the modified samples before and after the irradiation in 5 modes. Using scanning electron microscopy, the authors carried out a fractographic analysis of the fracture surface of the samples obtained as a result of tension. **Originality.** The development of a unique method for modifying the AK5M2 alloy makes it possible to improve its strength and morphological properties compared to the material in its original state. **Results.** As a result of the mechanical tests, the authors determined the values of yield strength, ultimate tensile strength, relative residual elongation and reduction at fracture. The dependence between the change in the deformation characteristics and the structure of the fracture surface on the electron-beam processing modes was established. Based on the tests performed on the samples of the Ti surface-modified AK5M2 alloy, the authors revealed a mode of electron-beam processing, leading to the formation of a surface structure characterized by higher mechanical properties. **Practical Relevance.** The Ti surface modification of the AK5M2 alloy after electron-beam processing in a mode using an electron beam energy density of 30 J/cm² results in the increase in the strength characteristics. The parameters of this mode can be used for local hardening of parts made of this alloy, for example, bush bearings.

Keywords: modification of alloys, electron-beam processing, vacuum arc method, mechanical characteristics of AK5M2, fractography

The research was funded by the grant from the Russian Science Foundation, No.19-79-10059, <https://rscf.ru/project/19-79-10059/>.

The research was carried out using the equipment of the Materials Science Shared Use Center at Siberian State Industrial University.

For citation

Serebryakova A.A., Zaguliaev D.V., Shlyarov V.V., Shliarova Yu.A., Ivanov Yu.F., Ustinov A.M. Study on Mechanical Characteristics and Fracture Surface Morphology of the Ti Surface-Modified AK5M2 Alloy. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 1, pp. 32-44. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-32-44>

Введение

Модификация свойств поверхностных слоев легких металлов и сплавов, таких как силумин [1, 2], является не только весьма распространенной областью исследований, но и актуальной в настоящее время [3]. Общеизвестно, что наибольшую нагрузку и, соответственно, разрушение детали начинается именно с поверхности. В связи с этим требования, предъявляемые к качеству подготовки, свойствам и характеристикам поверхностных слоев ответственных изделий, неуклонно увеличиваются. Алюминиевые сплавы системы Al-Si наиболее широкое применение нашли в автомобилестроении [4-6] и авиакосми-

ческой промышленности [7]. Свойства поверхностных слоев изделий, применяемых в данных отраслях, должны обеспечивать высокую надежность и износостойкость. Факторами, определяющими эффективность работы поверхностного слоя изделий, являются прочность и твердость упрочненной зоны, однородность структуры и свойств, высокое сопротивление разрушению, сопротивление к образованию трещины [8].

На данный момент в области физического материаловедения уделяется большое внимание повышению свойств металлов и сплавов за счет обработки концентрированными потоками энергии [9, 10]. К методам модифицирования поверхностных свойств относятся: ионные пучки, обработка

при помощи плазмы и ультразвука и др. Одним из наиболее эффективных и экологичных методов является электронно-пучковая обработка (ЭПО) [11-13]. Преимуществами ЭПО по сравнению с остальными методами модифицирования можно назвать: высокую энергетическую эффективность, более высокую однородность плотности энергии по сечению потока, хорошую воспроизводимость импульсов и высокую частоту их следования. Это направление развивается на базе созданных установок «Solo» [14-16], «Gesa» [17-19] и «Nadezhda» [20-22].

Известен также способ легирования поверхностного слоя с помощью напыления тонкой пленки на поверхность материала и последующего переплавления пленки с поверхностным слоем (подложкой) вакуумно-дуговым методом [23]. Как показывают современные исследования, максимального эффекта в модифицировании поверхностных слоев металлов и сплавов можно достигнуть благодаря комплексной обработке и комбинированию методов энергетических воздействий [24-28]. Одним из видов комплексной обработки является комбинирование легирования путем нанесения пленки на поверхность исследуемого материала методом ионно-плазменного напыления с последующим переплавлением модифицированного слоя электронным пучком. Применение данных инновационных методов обработки позволяет повысить прочностные свойства поверхности материалов и сплавов, а следовательно, и увеличить механические свойства изготовленных из них деталей.

В связи с вышеперечисленным данная работа является актуальной, так как ее цель состоит в исследовании влияния облучения электронным пучком на сплав АК5М2 с поверхностно модифицированным слоем Ti, а именно на изменение механических свойств при растяжении, а также изменение фрактографии изломов разрушенных образцов.

Материалы и методы исследования

В качестве материала исследований использован сплав АК5М2, образцы в форме пропорциональных лопаток в литом состоянии. В литом состоянии образцы имели следующие размеры: толщина 2,48 мм; ширина 9,1 мм; длина рабочей части 15,0 мм.

Формирование композитного материала происходило вакуумно-дуговым методом на автоматизированной вакуумной ионно-плазменной установке «Квинта» [29]. На образцы сплава АК5М2 напыляли пленку титана толщиной (0,5-1) мкм с помощью дугового испарителя при следующих параметрах процесса: образцы располагались

напротив дугового испарителя, напыление производилось без вращения образца, ток дугового испарителя $I_d = 80$ А (ток электродинамической стойкости), $I_{п} = 20$ А (пусковой ток), $I_n = 135$ А (номинальный ток), $\gamma = 75$ %, $U_{см} = 35$ В, $p = 0,3$ Па, $t = 10$ мин.

Облучение импульсным электронным пучком проводилось на установке «Соло» [30]. В ходе эксперимента значения параметров работы установки при облучении были следующие: энергия ускоренных электронов $U = 17$ кэВ, плотность энергии пучка электронов $E_s = 10, 20, 30, 40, 50$ Дж/см², длительность импульсов $\tau = 200$ мкс, количество импульсов $n = 3$, частота следования импульсов $f = 0,3$ с⁻¹; давление остаточного газа (аргон) в рабочей камере установки $p = 2 \cdot 10^{-2}$ Па. Данные параметры являются рациональными параметрами электронно-пучковой обработки, приводящими к формированию в модифицированном слое градиентных, многоэлементных, многофазных, наноструктурированных состояний с уникальными свойствами. Изменение этих параметров в меньшую либо большую сторону не приводит к такому результату. Выбор представленных в данной работе режимов ЭПО обусловлен широким объемом исследований, подтвердивших на практике эффективность данных параметров по сравнению с другими. Результаты исследований, свидетельствующие о высокой эффективности данных параметров при повышении микротвердости, износостойкости, представлены в монографии [31].

Механические испытания сплава АК5М2, поверхностно модифицированного Ti, осуществляли путем одноосного растяжения образцов на испытательной машине «Instron 3386» с постоянной скоростью 1,25 мм/мин [32]. Одноосному растяжению подвергались образцы сплава АК5М2 в литом состоянии, АК5М2, поверхностно модифицированный Ti, и АК5М2, поверхностно модифицированный Ti с последующим ЭПО, по режимам: 1 режим – плотность энергии пучка электронов $E_s = 10$ Дж/см², 2 режим – $E_s = 20$ Дж/см², 3 режим – $E_s = 30$ Дж/см², 4 режим – $E_s = 40$ Дж/см², 5 режим – $E_s = 50$ Дж/см². Исследования поверхности разрушения проводили методами сканирующей электронной микроскопии [33-35], используя прибор «Philips SEM-515» с микроанализатором EDAX ECON IV.

Результаты исследований

В результате механических испытаний сплава АК5М2 в литом состоянии, сплава АК5М2, поверхностно модифицированного Ti, и сплава АК5М2, поверхностно модифицированного Ti с

последующим облучением электронным пучком по 5-ти режимам, были установлены режимы, при которых наблюдается изменение механических характеристик сплава. На **рис. 1** представлены деформационные кривые разрушения материала в координатах «напряжение (МПа) – деформация (%)» для сплава АК5М в исходном состоянии, АК5М2, поверхностно модифицированного Ti, и АК5М2, поверхностно модифицированного Ti с последующим ЭПО ($E_s = 30$ Дж/см²).

На **рис. 1** представлены деформационные кривые, полученные в результате одноосного растяжения образцов сплава АК5М2 в различном состоянии. Кривая 1 показывает процесс растяжения до разрушения образца сплава АК5М2 в литом состоянии, напряжение при разрушении составило 118 МПа. Кривая 2 получена в результате растяжения до разрушения сплава АК5М2 с поверхностно модифицированным слоем Ti, напряжение при разрушении данного

образца составляет 155 МПа. Кривая 3 получена в результате растяжения до разрушения сплава АК5М2, поверхностно модифицированного Ti с последующим облучением электронным пучком по режиму 3 ($E_s = 30$ Дж/см²), напряжение при разрушении составило 140 МПа. Таким образом, по деформационным кривым наблюдается увеличение значения напряжения при разрушении образцов сплава АК5М2 с поверхностно модифицированным слоем Ti (см. **рис. 1**, кривая 2) и сплава АК5М2, поверхностно модифицированного Ti с последующим облучением электронным пучком (см. **рис. 1**, кривая 3) в режиме №3, по сравнению со значениями, полученными при разрушении образца сплава АК5М2 в литом состоянии (см. **рис. 1**, кривая 1).

Анализ результатов исследования механических характеристик, таких как временное сопротивление и предел текучести, представлен на гистограммах (**рис. 2**).

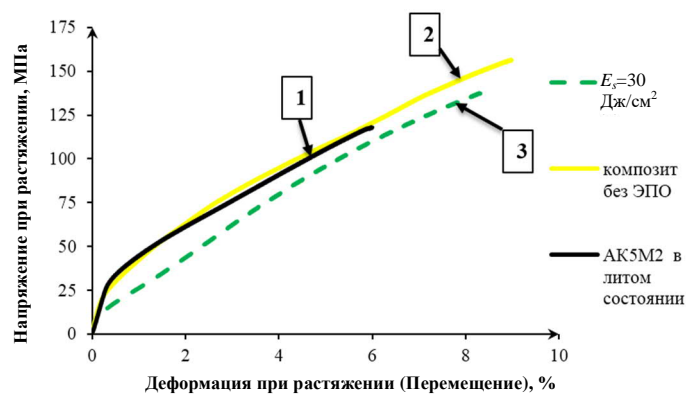
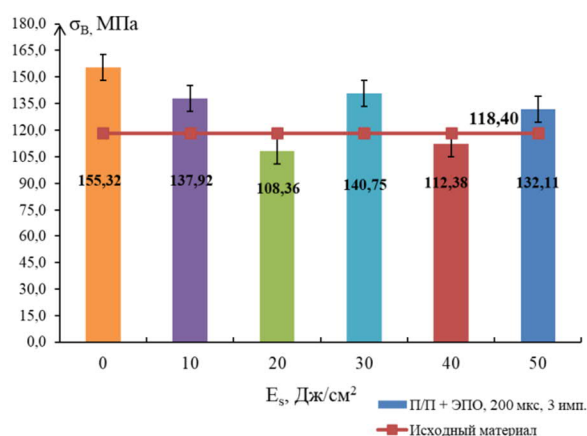
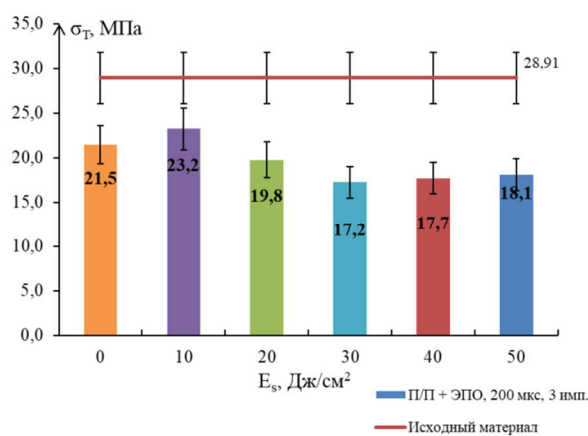


Рис. 1. Деформационные кривые разрушения материала

Fig. 1. Stress-strain curves of the material



а



б

Рис. 2. Зависимость временного сопротивления (а) и изменение предела текучести (б) в зависимости от значения плотности пучка электронов от режима обработки

Fig. 2. Relationship between ultimate tensile strength (а) and the change in yield strength (б), and the electron beam density in the processing mode

В процессе механических испытаний путем одноосного растяжения были разрушены образцы сплава АК5М2 в литом состоянии, образцы сплава АК5М2, поверхностно модифицированного Ti, и образцы сплава АК5М2, поверхностно модифицированного Ti с последующим облучением электронным пучком по 5-ти режимам, описанным выше. Временное сопротивление системы пленка(титан)/подложка(силумин) составил 155,3 МПа, что на 31,2% больше по сравнению с литым состоянием. Далее по режимам 2 и 4 наблюдается снижение временного сопротивления облученных образцов на 8,4 и 5% соответственно. Значение временного сопротивления по режиму 5 ЭПО находится в рамках погрешности с режимом 4. Таким образом, утверждать, что при данном режиме облучения происходит увеличение исследуемой характеристики, не представляется возможным. Предположительно, снижение временного сопротивления материала связано с разупрочнением материала под влиянием энергетического воздействия. Облучение электронным пучком влияет на процесс разупрочнения посредством перераспределения точечных дефектов и дислокаций в сплаве, образующихся при пластической деформации образцов.

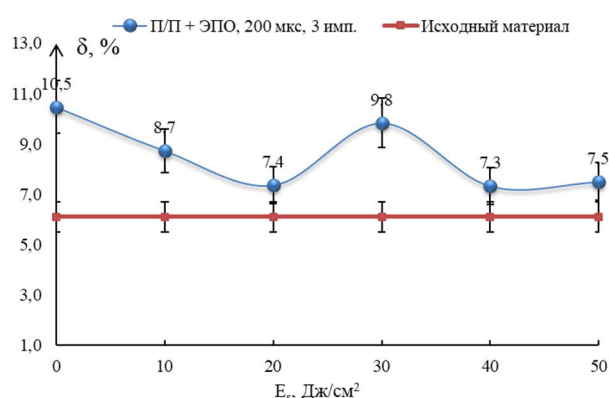
По режимам 1 и 3 ЭПО системы пленка(титан)/подложка(силумин) выявляется рост временного сопротивления по сравнению с материалом в литом состоянии (режим 1 – 16,5%; режим 3 – 18,8%). Как показано в работе [36], существует две причины изменения прочностных и пластических характеристик сплава АК5М2 при ЭПО: 1) образование ячеистой, субмикро-

кристаллической структуры высокоскоростной кристаллизации; 2) растворение инетрметаллидов в облученном слое.

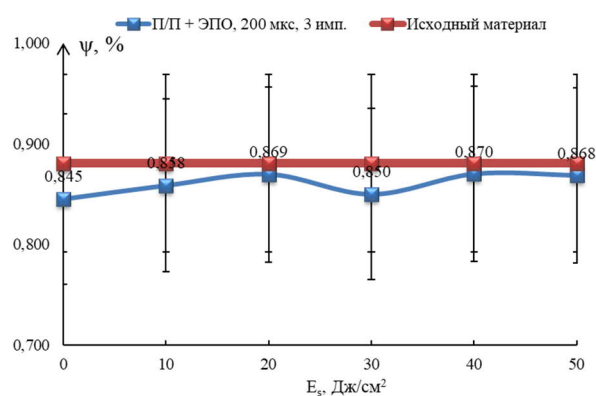
По результатам механических испытаний были определены значения предела текучести по всем режимам ЭПО (см. **рис. 2, б**).

При одноосном растяжении образца силумина АК5М2 в литом состоянии предел текучести составил 28,91 МПа. При разрушении композитного материала без ЭПО предел текучести равен 21,5 МПа. При всех режимах облучения наблюдается снижение предела текучести. Максимальный эффект влияния на значения предела текучести оказывает режим 3, предел текучести составил 17,2 МПа (ЭПО с плотностью пучка электронов 30 Дж/см²), что на 40% меньше, чем в литом состоянии. Снижение предела текучести сплава предположительно связано с изменениями его структурных свойств в результате обработки электронным пучком. В процессе обработки происходит изменение дислокационной структуры исследуемого материала, что, в свою очередь, влияет на возникновение напряжений, при которых остаточная деформация в образце распределяется равномерно по его рабочей части, при временном постоянстве растягивающего усилия [37].

После испытаний на растяжение до разрушения вычислены параметры относительного остаточного удлинения (**рис. 3, а**) и относительного остаточного сужения (**рис. 3, б**) при разрыве образцов силумина, модифицированных по всем представленным в настоящей работе режимам. Данные параметры являются характеристиками пластичности материала [38].



а



б

Рис. 3. Относительное остаточное удлинение (а) и относительное остаточное сужение образцов (б) при разрушении в литом состоянии и после электронно-пучковой обработки

Fig. 3. Relative residual elongation (a) and relative reduction at fracture of the samples (b) in the original state and after electron-beam processing

В литом состоянии процент остаточного удлинения образца при разрыве составил $\delta=6,1\%$ (красная линия на **рис. 3, а**). По режимам 1 и 3 выявляется увеличение значений относительного остаточного удлинения по сравнению с литым состоянием. При нулевом значении плотности энергии пучка электронов (разрушение необлученного образца сплава АК5М2, поверхностно модифицированного Ti), значение относительного остаточного удлинения увеличилось до $\delta=10,5\%$. При растяжении образцов, облученных по режиму 1, значение относительного остаточного удлинения составило $8,7\%$. При режимах 2, 4 и 5 не выявлено изменений значения в пределах погрешности измерения. После облучения по режиму 3 значение относительного остаточного удлинения составило $\delta=9,8\%$.

На основании механических испытаний получены данные о значениях относительного остаточного удлинения образцов (см. **рис. 3, б**). В литом состоянии (красная линия на **рис. 3, б**) образец АК5М2 имеет значение относительного остаточного сужения $\psi = 0,880\%$. При растяжении необлученного образца композитного материала, состоящего из подложки, изготовленной из сплава АК5М2 с поверхностно модифицированным слоем Ti, остаточное сужение образцов при разрушении $\psi = 0,845$. Далее получены значения по режимам: режим 1 – $\psi = 0,858$; режим 2 – $\psi = 0,869$; режим 3 – $\psi = 0,850$, режим 4 – $\psi = 0,870$, режим 5 – $\psi = 0,868$. Таким образом, проанализировав полученные значения, можно отметить, что значения остаточного сужения образца в процессе механических испытаний находятся в пределах погрешности измерений. Отсутствие изменений в пределах погрешности измерений позволяет утверждать о том, что изменение плотности энергии пучка электронов не оказывает влияния на относительное остаточное сужение образца.

В исследовании [39] с помощью РФА и СЭМ-анализа выявлена динамика морфологии поверхности сплава АК5М2, модифицированного Ti. При режимах 1 и 2 на поверхности сплава АК5М2, модифицированного Ti, СЭМ-анализ выявил наличие не полностью растворенных капель титана (состав на рентгенограмме), что говорит о недостаточности энергии плотности пучка электронов для образования однородного покрытия. Режимы 4 и 5, характеризующиеся большими значениями плотности энергии пучка электронов, напротив, приводят к чрезмерному высокотемпературному переплавлению материала. Данный процесс способствует образованию кратеров, трещин, микроуглублений на поверхности и в слое материала, что может привести к разрушению материала в процессе эксплуатации. На основании результатов РФА и СЭМ-анализа сплава АК5М2 после напыления на его поверхность пленки титана с последующей обработкой электронным пучком по различным режимам выявлен режим обработки, при котором образуется однородная мелкозернистая структура без трещин, микроуглублений и других дефектов. Очевидно, что данный режим воздействия (режим 3) приведет к существенной трансформации свойств материала в сторону их улучшения.

Ниже представлены результаты сканирующей электронной микроскопии изломов образцов сплава АК5М2, поверхностно модифицированного Ti при различных режимах облучения.

На **рис. 4** изображены фрактограммы изломов образцов сплава АК5М2, поверхностно модифицированного Ti с последующим облучением электронным пучком с плотностью энергии пучка электронов 10 Дж/см^2 .

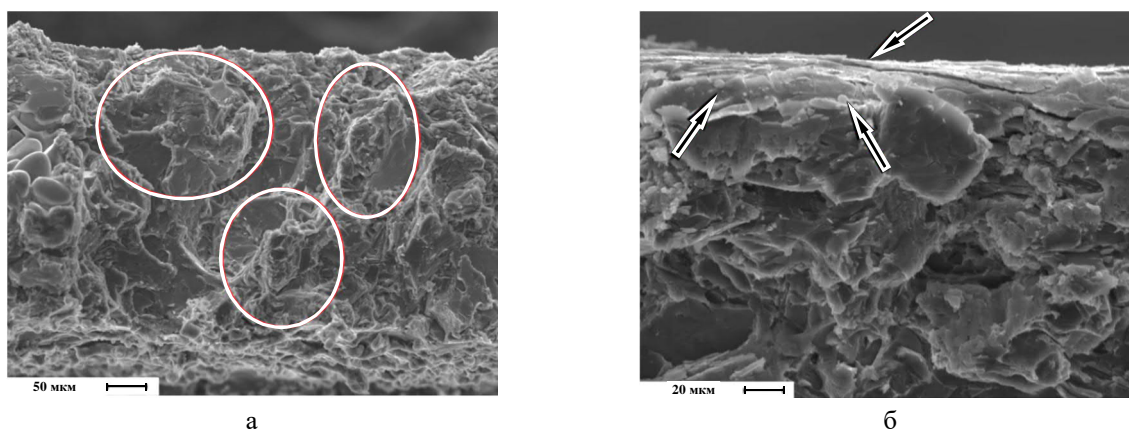


Рис. 4. Изображение структуры изломов образцов сплава АК5М2, поверхностно модифицированного Ti с последующим облучением электронным пучком с плотностью энергии пучка электронов 10 Дж/см^2
 Fig. 4. Image of the fracture structure of the samples of the Ti surface-modified АК5М2 alloy followed by electron beam irradiation with an electron beam energy of 10 J/cm^2

Анализ излома образцов сплава АК5М2, поверхностно модифицированного Ti с последующим облучением с плотностью энергии пучка электронов 10 Дж/см^2 , показывает ступенчатый тип микрорельефа поверхности разрушения, характерный для хрупкого излома. Цвет микрорельефа пепельно-серый, без блеска. Ступеньки изогнутой формы расположены на различном уровне друг от друга (рис. 4, а). Предположительно, образование такого элемента микрорельефа, как ступенька, может происходить в результате скола вдоль границ двойников [40, 41]. На рис. 4, б наблюдается слой Ti, постепенно растворяющегося под воздействием ЭПО.

На рис. 5 изображены фактограммы изломов образцов сплава АК5М2, поверхностно модифицированного Ti с последующим облучением электронным пучком с плотностью энергии пучка электронов 20 Дж/см^2 .

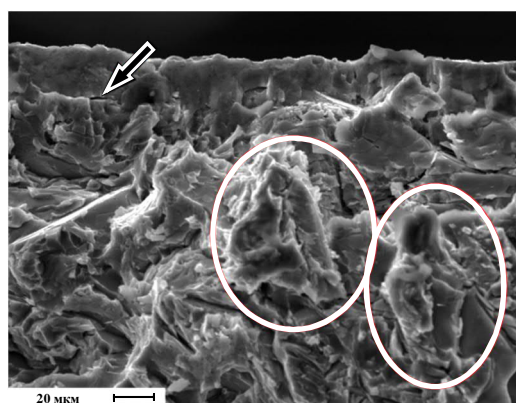
С увеличением плотности энергии пучка электронов до 20 Дж/см^2 при обработке сплава АК5М2, поверхностно модифицированного Ti, наблюдаются изменения морфологии поверхности излома. Как видно на рис. 5, напыленный слой Ti под воздействием ЭПО становится более однородным с поверхностью сплава АК5М2. Ступени и гребни на поверхности излома характеризуются большим размером (рис. 5, а), по сравнению с предыдущим СЭМ-изображением излома при обработке с меньшей плотностью

энергии пучка электронов, и составляет от 40 до 70 мкм. Размер напыленного слоя составляет около 20 мкм (рис. 5, б, стрелки).

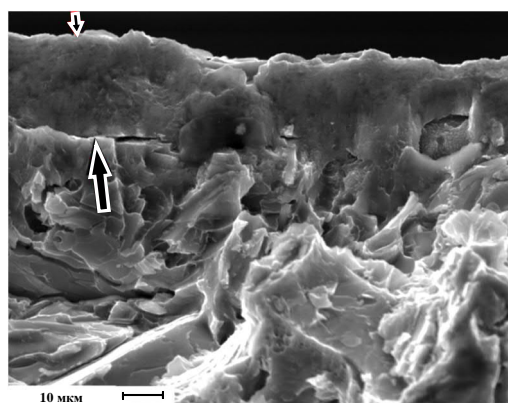
На рис. 6 изображены фактограммы изломов образцов сплава АК5М2, поверхностно модифицированного Ti с последующим облучением электронным пучком с плотностью энергии пучка электронов 30 Дж/см^2 .

Исследования морфологии поверхности излома образца сплава АК5М2, поверхностно модифицированного Ti и облученного с плотностью энергии пучка электронов 30 Дж/см^2 , выявляют наименьшую ступенчатость микрорельефа излома, по сравнению с изломами образцов, полученных при двух предыдущих режимах обработки. Размер напыленного слоя составляет 20-23 мкм (рис. 6, а). Структура излома становится более однородной, без ярко выраженных гребней и ступеней. Выявлено образование ячеистого строения излома (рис. 6, б, стрелки), с размерами ячеек от 0,5 мкм. Также наблюдается образование ямок (микроуглублений) внутри излома (рис. 6, б, овалы). Данный вид микроуглублений образуется при пластическом течении сплава в процессе растяжения [30].

На рис. 7 изображены фактограммы изломов образцов сплава АК5М2, поверхностно модифицированного Ti с последующим облучением электронным пучком с плотностью энергии пучка электронов 40 и 50 Дж/см^2 .



а



б

Рис. 5. Изображение структуры изломов образцов сплава АК5М2, поверхностно модифицированного Ti с последующим облучением электронным пучком с плотностью энергии пучка электронов 20 Дж/см^2
Fig. 5. Image of the fracture structure of the samples of the Ti surface-modified AK5M2 alloy followed by electron beam irradiation with an electron beam energy of 20 J/cm^2

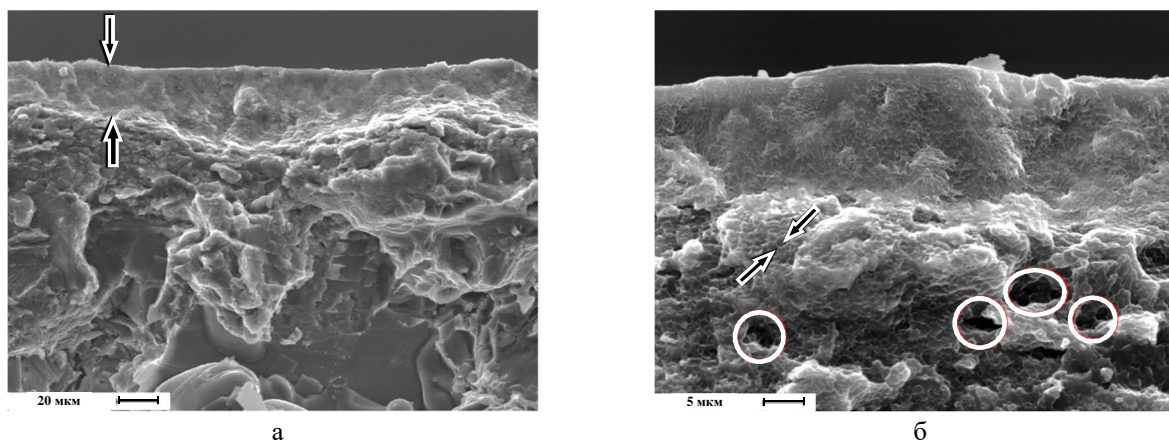


Рис. 6. Изображение структуры изломов образцов сплава АК5М2, поверхностно модифицированного Тi с последующим облучением электронным пучком с плотностью энергии пучка электронов 30 Дж/см²
 Fig. 6. Image of the fracture structure of the samples of the Ti surface-modified AK5M2 alloy followed by electron beam irradiation with an electron beam energy of 30 J/cm²

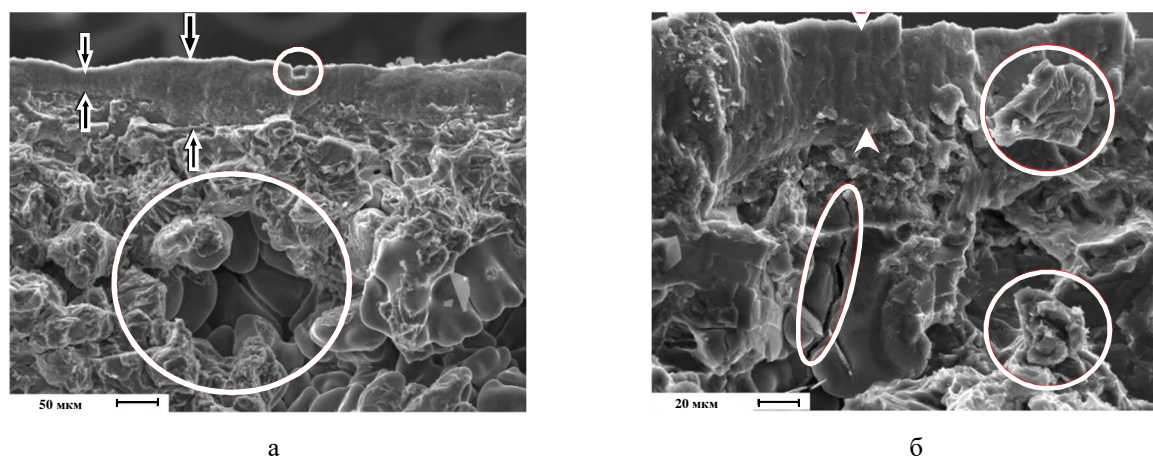


Рис. 7. Изображение структуры изломов образцов сплава АК5М2, поверхностно модифицированного Тi с последующим облучением электронным пучком с плотностью энергии пучка электронов 40 Дж/см² (а) и 50 Дж/см² (б)
 Fig. 7. Image of the fracture structure of the samples of the Ti surface-modified AK5M2 alloy followed by electron beam irradiation with an electron beam energy of 40 J/cm² (a) and 50 J/cm² (б)

Увеличение плотности энергии пучка электронов до 40 Дж/см² при облучении сплава АК5М2, поверхностно модифицированного Тi, привело к формированию неоднородной поверхности излома, по сравнению с поверхностью, полученной при обработке с плотностью энергии пучка электронов 30 Дж/см². Размер напыленного слоя составляет 20-50 мкм (рис. 7, а, стрелки). В поверхности напыленного слоя выявляются углубления (предположительно трещины), которые могут быть очагом разрушения материала (рис. 7, а, овал). В слое сплава АК5М2 выявляются ямки размерами около 100 мкм. Морфология излома образца сплава АК5М2, поверхностно модифицированного Тi и облученного с максимальным (из представ-

ных режимов) значением энергии пучка электронов 50 Дж/см², представлена разнообразным строением, включающим трещины (рис. 7, б), различными выемками и выступами. Размер напыленного слоя также неоднородный.

Закключение

1. В процессе одноосного растяжения до разрушения образцов в разном состоянии получены кривые процесса деформации сплава АК5М2. При растяжении образцов сплава АК5М2, модифицированного Тi и облученного электронным пучком с плотностью энергии 30 Дж/см² (режим 3), выявлен максимальный показатель временного сопротивления $\sigma_{\text{п}} = 140,7$ МПа, который превысил показатель исходного материала на 18,8%, что

говорит о повышении прочности исследуемого материала благодаря электронно-пучковой обработке при этом режиме. Кроме того, при облучении по режиму 3 (30 Дж/см^2) предел текучести системы снизился до $\sigma_T = 17,2 \text{ МПа}$, в сравнении с литым состоянием значение уменьшилось на 40%. Параметр относительного остаточного удлинения образца, поверхностно модифицированного титаном и облученного при режиме 3, достиг значения $\delta = 9,8\%$, превысив значение в литом состоянии на 60%. Следует отметить, что согласно ГОСТ 1583-93 типовыми режимами термообработки сплава АК5М2 являются режимы Т5 (закалка и кратковременное (неполное) искусственное старение) и Т8 (закалка и смягчающий отпуск), в результате которых достигается значение временного сопротивления разрыву в 206 и 147 МПа соответственно. Однако термообработка сплавов приводит к изменению структуры и свойств всего объема материала, и к тому же процесс является очень длительным по времени, тогда как ЭПО позволяет локально изменять физико-механические характеристики за счет создания градиента температур ($10^6\text{-}10^7 \text{ К/с}$) между обрабатываемой поверхностью и объемом материала.

2. Фрактография поверхности излома образцов позволила выявить, что при режимах 1 и 2 величина плотности энергии пучка электронов является недостаточной для формирования однородного материала, структура излома образцов, облученных по данным режимам, характеризуется высокой ступенчатостью. При режиме 3 ступенчатый характер излома снижается, происходит формирование ровного однородного поверхностного слоя. Структура становится мелкоячеистой, без трещин, ямок и микроуглублений, что говорит об увеличении прочностных характеристик материала. Режимы 4 и 5 приводят к образованию глубоких трещин и кратеров, выявленных в структуре излома. Происходит переплавление материала, обработка по данным режимам не приводит к формированию эффективного поверхностного слоя. Наличие в предположенных слоях материала дефектов структуры, к которым можно отнести микротрещины и ямки, можно объяснить механизмом, согласно которому преобразование структурных элементов происходит вследствие разрушения пластин кремния из-за различия коэффициентов линейного термического расширения матрицы и включения. Так как по сравнению с алюминиевой матрицей объемная доля пластин кремния

мала, то основной вклад в тепловое расширение вносит алюминиевая матрица. Коэффициент линейного расширения алюминия в 4 раза больше, чем кремния. В этой связи тепловые расширения (сжатия) двух фаз в большинстве случаев несовместны. Это приводит к неизбежному возникновению механических напряжений между фазами. Включения кремния способны ассимилировать только 1/4 теплового расширения (сжатия), передаваемого алюминиевой матрицей, через собственное тепловое расширение (сжатие). Остальная часть идет на деформацию матрицы и разрушение пластин кремния (вследствие их хрупкости). Возникновение трещин обусловлено неоднородностями поверхности включения. Образовавшиеся трещины будут являться капиллярами для атомов алюминия. Механические напряжения, создаваемые трещинами, будут аналогами капиллярных сил, перемещающих атомы матрицы в образовавшиеся промежутки между включениями, а в обратном направлении идут потоки вакансий и атомов кремния.

3. Увеличение временного сопротивления можно связать с формированием внутри материала однородной структуры, выявленной по результатам фрактографии. Отсутствие в материале концентраторов напряжений в виде различных дефектов (трещины, ямки, кратеры) обуславливает способность материала сопротивляться разрушению.

4. На основании проведенных испытаний образцов сплава АК5М2, модифицированного Ti с последующим облучением электронным пучком, выявлен режим электронно-пучковой обработки, приводящий к формированию в поверхностном слое силовой структуры, характеризующейся повышенными механическими свойствами, выявленными при одноосном растяжении образцов. Режим 3 обладает наиболее выгодным сочетанием параметров обработки: энергия ускоренных электронов $U = 17 \text{ кэВ}$, плотность энергии пучка электронов $E_S = 30 \text{ Дж/см}^2$, длительность импульсов $\tau = 200 \text{ мкс}$, количество импульсов $n = 3$, частота следования импульсов $f = 0,3 \text{ с}^{-1}$, давление остаточного газа (аргон) в рабочей камере установки $p = 2 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$.

Таким образом, в данной работе доказано влияние электронно-пучковой обработки на повышение прочности, пластичности, изменение морфологии исследуемого сплава АК5М2, поверхностно модифицированного Ti.

Список источников

- Otani B. Silumin and its Structure // J. Inst. Met. 2022, no. 36, 1926 p.
- Qi M., Kang Y., Qiu Q., Tang W., Li J. Microstructures, mechanical properties, and corrosion behavior of novel high-thermal-conductivity hypoeutectic Al-Si alloys prepared by rheological high pressure die-casting and high pressure die-casting // J. Alloys Compd. 2018, vol. 15(745), pp. 487-502.
- Marukovich E., Stetsenko V. The problem of modifying an aluminum-silicon eutectic alloy of silumins. Way of solutions // Litiyo i Metallurgiya. 2018, vol. 91, no. 2, pp. 12-15.
- Anantha Padmanaban D., Kurien G. Silumins. The automotive alloys // Advanced Materials and Processes. 2012, no. 170, pp. 28-30.
- Mechanical properties and microstructures of a modified Al-Si-Cu alloy prepared by thixoforming process for automotive connecting rods / S. Samat, M.Z. Omar, A.H. Baghdadi, I.F. Mohamed, A.M. Aziz // J. Mater. Res. Tech. 2021, no. 10, pp. 1086-1102.
- Javidani M., Larouche D. Application of cast Al-Si alloys in internal combustion engine components // International Materials Reviews. 2014, vol. 59, no. 3, pp. 132-158.
- Robles Hernandez F.C., Herrera Ramírez J.M., Mackay R. Al-Si Alloys: Automotive, Aeronautical, and Aerospace Applications. Cham, 2017.
- Грищенко Н.А., Сидельников С.Б., Губанов И.Ю. Механические свойства алюминиевых сплавов: монография. Красноярск: СФУ, 2012. 196 с.
- Модификация структуры и свойств эвтектического силумина электронно-ионно-плазменной обработкой / А.П. Ласковнев, Ю.Ф. Иванов, Е.А. Петрикова и др. Минск: Беларус. навука, 2013. 287 с.
- Волочко А.Т. Модифицирование эвтектических и первичных частиц кремния в силуминах. Перспективы развития // Литьё и металлургия. 2015. №4. С. 39-45.
- Study on surface alloying of 38CrMoAl steel by electron beam / Ren X., Wang R., Wei D. et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2021, vol. 505, pp. 44-49.
- Influence of irradiation number of high current pulsed electron beam on the structure and properties of M50 steel / Xu F., Tang G., Guo G., Ozur G. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2010, vol. 15, pp. 2395-2399.
- The effect of high-intensity electron beam on the crystal structure, phase composition, and properties of Al-Si alloys with different silicon content / D.V. Zagulayev, S.V. Konovalov, Yu.F. Ivanov, V.E. Gromov, V.V. Shlyarov, Yu.A. Rubannikova // Progress in Physics of Metals. 2021, vol. 22, no. 1, pp. 129-157.
- A facility for metal surface treatment with an electron beam / N.N. Koval', P.M. Shchanin, V.N. Devyatkov, V.S. Tolkachev, L.G. Vintizenko // Instruments and Experimental Techniques. 2005, vol. 48, pp. 117-121.
- Vorobyov M.S., Koval N.N., Sulakshin S.A. An electron source with a multiaperture plasma emitter and beam extraction into the atmosphere // Instruments and Experimental Techniques. 2015, vol. 58, pp. 687-695.
- Koval' N.N., Ivanov Yu.F. Nanostructuring of surfaces of metalloceramic and ceramic materials by electron-beams // Russian Physics Journal. 2008, vol. 51, pp. 505-516.
- Pulsed electron beam facility (GESA) for surface treatment of materials / V. Engel'ko, B. Yatsenko, G. Mueller, H. Bluhm // Vacuum. 2001, vol. 62/2-3, pp. 211-216.
- Electron beam facility GESA-SOFIE for in-situ characterization of cathode plasma dynamics / R. Fetzer, W. An, A. Weisenburger, G. Müller // Vacuum. 2017, vol. 145, pp. 179-185.
- Application of high-current pulsed electron beams for modifying the surface of gas-turbine engine blades / V.A. Shulov, A.N. Gromov, D.A. Teryaev, V.I. Engel'ko // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2016, vol. 57, pp. 256-265.
- Proskurovsky D.I., Rotshtein V.P., Ozur G.E. Use of low-energy, high-current electron beams for surface treatment of materials // Surface Coat. Technol. 1997, vol. 96, pp. 117-122.
- Pulsed electron-beam technology for surface modification of metallic materials / D.I. Proskurovsky, V.P. Rotshtein, G.E. Ozur, A.B. Markov, D.S. Nazarov, M.A. Shulov, Yu. F. Ivanov, R.G. Buchheit // Journal of Vacuum Science and Technology A: Vacuum, Surfaces and Films. 1998, vol. 16, pp. 2480-2488.
- Ozur, G.E., Proskurovsky D.I. Generation of Low-Energy High-Current Electron Beams in Plasma-Anode Electron Guns // Plasma Physics Reports. 2018, vol. 44, pp. 18-39.
- Электронно-ионно-плазменная модификация поверхности цветных металлов и сплавов / под общ. ред. Н.Н. Коваля и Ю.Ф. Иванова. Томск: Изд-во НТЛ, 2016. 312 с.
- Barrirero J. Eutectic Modification of Al-Si casting alloys. Materials Science. 2019, 113 p.
- Федун В., Коляда Ю. Динамика фазовых превращений при поверхностной модификации металлов и сплавов электронным пучком // Вопросы атомной науки и техники. 2010. № 7. С. 316-320.
- Bratushka S., Malikov L.V. Ion-plasma modification of titanium alloys // Problems of Atomic Science and Technology. 2021, pp. 126-140.
- Andrianova N., Borisov A., Krit B., Mashkova E., Ovchinnikov M., Timofeev M., Umarov F. Ion-plasma modification of the surface of light fiber materials. Journal of Physics: Conference Series. 2020, no. 1713, pp. 012006.
- Эволюция структуры и свойств силумина АК10М2Н, облученного интенсивным импульсным электронным пучком / В.Е. Громов, И.Ф. Иванов, Д.В. Загуляев и др. // Неорганические материалы. 2018. Т. 54. № 12. С. 1372-1378.

29. Electron-ion-plasma modification of the structure and properties of commercial steels / Yu. Ivanov, A. Klopotov, A. Potekaev, N. Koval, V. Vlasov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017, no. 168, 012070.
30. Zaguliaev D., Gromov V., Konovalov S. Electron-Ion-Plasma Modification of a Hypereutectic Al-Si Alloy (1st Edition), CRC Press, 2020.
31. Структура и упрочнение силумина, модифицированного электронно-ионной плазмой: монография / В.Е. Громов, Д.В. Загуляев, Ю.Ф. Иванов, С.В. Конавалов, С.А. Невский, В.Д. Сарычев, Е.А. Будовских, Ю.А. Рубанникова; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Сибирский государственный индустриальный университет. Новокузнецк: Издательский центр СибГИУ, 2020. 287 с.
32. ISO 6892-1:2016. Metallic materials – Tensile testing. Part 1: Method of test at room temperature. 2016. 79 p.
33. Inkson B.J. Scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM) for materials characterization. Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods Elsevier Ltd. 2016, pp. 17-43.
34. Primig S., Theska F., Haghdadi N. 'Electron Microscopy Methods', in Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys, Elsevier, 2021, pp. 203-211.
35. Kuo J. Electron Microscopy: Methods and Protocols (3rd Ed.). Humana Press, Totowa, NJ, 2014, 799 p.
36. Evolution of strength properties and defect substructure of the hypoeutectic A319.0 alloy irradiated by a pulsed electron beam and fractured under tensile stress / D.V. Zaguliaev, Yu.F. Ivanov, A.A. Klopotov, A.M. Ustinov, V.V. Shlyarov, D.F. Yakupov. Materialia, 2021, vol. 20, 101223.
37. Zbigniew H., Stachurski Z., Wang G., Tan X. Plastic deformation and yield strength of metals // An Introduction to Metallic Glasses and Amorphous Metals. 2021, pp. 235-312.
38. Chung K., Lee M.-G. Basics of Continuum Plasticity: Plasticity Characteristics (in Simple Tension / Compression). Springer, 2018, pp. 23-42.
39. Dynamics of elemental and phase composition of the surface of AK5M2 alloy modified with Ti and irradiated by an electron beam / A.A. Serebryakova, D.V. Zagulyaev, Yu.A. Shlyarova. Yu.F. Ivanov and A.M. Ustinov // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2022, vol. 16, no. 6, pp. 1081-1088.
40. Герасимова Л.П., Ежов А.А., Маресев М.И. Изломы конструкционных сплавов: справочник. М.: Металлургия, 1987. 272 с.
41. Чегуров М.К., Сорокина С.А. Основы фактографического анализа изломов образцов из конструкционных сплавов: учеб. пособие. Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2018. 79 с.

References

1. Otani B. Silumin and its structure. J. Inst. Met. 2022;(36):1926.
2. Qi M., Kang Y., Qiu Q., Tang W., Li J. Microstructures, mechanical properties, and corrosion behavior of novel high-thermal-conductivity hypoeutectic Al-Si alloys prepared by rheological high pressure die-casting and high pressure die-casting. J. Alloys Compd. 2018;15(745):487-502.
3. Marukovich E., Stetsenko V. The problem of modifying an aluminum-silicon eutectic alloy of silumins. Way of solutions. *Litiyo i metallurgiya* [Foundry Production and Metallurgy]. 2018;91(2):12-15. (In Russ.)
4. Anantha Padmanaban D., Kurien G. Silumins. The automotive alloys. Advanced Materials and Processes. 2012;(170): 28-30.
5. Samat S., Omar M.Z., Baghdadi A.H., Mohamed I.F., Aziz A.M. Mechanical properties and microstructures of a modified Al-Si-Cu alloy prepared by thixoforming process for automotive connecting rods. J. Mater. Res. Tech. 2021;(10):1086-1102.
6. Javidani M., Larouche D. Application of cast Al-Si alloys in internal combustion engine components. International Materials Reviews. 2014;59(3):132-158.
7. Robles Hernandez F.C., Herrera Ramírez J.M., Mackay R. Al-Si Alloys: Automotive, aeronautical, and aerospace applications. Cham, 2017.
8. Grishchenko N.A., Sidelnikov S.B., Gubanov I.Yu. *Mekhanicheskie svoystva alyuminiyevykh splavov: monografiya* [Mechanical properties of aluminum alloys: monograph]. Krasnoyarsk: Siberian Federal University; 2012. 196 p. (In Russ.)
9. Laskovnev A.P., Ivanov Yu.F., Petrikova E.A. et al. *Modifikatsiya struktury i svoystv evtekticheskogo silumina elektronno-ionno-plazmennoy obrabotkoy* [Modification of the structure and properties of eutectic silumin by electron-ion-plasma processing]. Minsk: Belarus. navuka; 2013. 287 p. (In Russ.)
10. Volochko A.T. Modification of eutectic and primary particles of silicon in silumins. Development prospects. *Litiyo i metallurgiya* [Foundry Production and Metallurgy]. 2015;(4):39-45. (In Russ.)
11. Ren X., Wang R., Wei D. et al. Study on surface alloying of 38CrMoAl steel by electron beam. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2021;505:44-49.
12. Xu F., Tang G., Guo G., Ozur G. Influence of irradiation number of high current pulsed electron beam on the structure and properties of M50 steel. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2010;15:2395-2399.
13. Zaguliaev D.V., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Shlyarov V.V., Rubannikova Yu.A. The effect of high-intensity electron beam on the crystal structure, phase composition, and properties of

- Al-Si alloys with different silicon content. Progress in Physics of Metals. 2021;22(1):129-157.
14. Koval N.N., Shchanin P.M., Devyatkov V.N., Tolkahev V.S., Vintizenko L.G. A facility for metal surface treatment with an electron beam. Instruments and Experimental Techniques. 2005;48:117-121.
15. Vorobyov M.S., Koval N.N., Sulakshin S.A. An electron source with a multiaperture plasma emitter and beam extraction into the atmosphere. Instruments and Experimental Techniques. 2015;58:687-695.
16. Koval N.N., Ivanov Yu.F. Nanostructuring of surfaces of metaloceramic and ceramic materials by electron-beams. Russian Physics Journal. 2008;51:505-516.
17. Engelko V., Yatsenko B., Mueller G., Bluhm H. Pulsed electron beam facility (GESA) for surface treatment of materials. Vacuum. 2001;62(2-3):211-216.
18. Fetzer R., An W., Weisenburger A., Müller G. Electron beam facility GESA-SOFIE for in-situ characterization of cathode plasma dynamics. Vacuum. 2017;145:179-185.
19. Shulov V.A., Gromov A.N., Teryaev D.A., Engelko V.I. Application of high-current pulsed electron beams for modifying the surface of gas-turbine engine blades. Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2016;57:256-265.
20. Proskurovsky D.I., Rotshtein V.P., Ozur G.E. Use of low-energy, high-current electron beams for surface treatment of materials. Surface Coat. Technol. 1997;96:117-122.
21. Proskurovsky D.I., Rotshtein V.P., Ozur G.E., Markov A.B., Nazarov D.S., Shulov M.A., Ivanov Yu. F., Buchheit R.G. Pulsed electron-beam technology for surface modification of metallic materials. Journal of Vacuum Science and Technology A: Vacuum, Surfaces and Films. 1998;16:2480-2488.
22. Ozur G.E., Proskurovsky D.I. Generation of low-energy high-current electron beams in plasma-anode electron guns. Plasma Physics Reports. 2018;44:18-39.
23. Koval N.N., Ivanov Yu.F. *Elektronno-ionno-plazmennaya modifikatsiya poverkhnosti tsvetnykh metallov i splavov* [Electron-ion-plasma modification of the surface of non-ferrous metals and alloys]. Tomsk: Publishing House of Technical and Scientific Literature; 2016. 312 p. (In Russ.)
24. Barrirero J. Eutectic modification of Al-Si casting alloys. Materials Science; 2019. 113 p.
25. Fedun V., Kolyada Yu. Dynamics of phase transitions during the surface modification of metals and alloys with an electron beam. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki* [Issues of Nuclear Science and Technology]. 2010;(7):316-320. (In Russ.)
26. Bratushka S., Malikov L.V. Ion-plasma modification of titanium alloys. Problems of Nuclear Science and Technology. 2021;126-140.
27. Andrianova N., Borisov A., Krit B., Mashkova E., Ovchinnikov M., Timofeev M., Umarov F. Ion-plasma modification of the surface of light fiber materials. Journal of Physics: Conference Series. 2020;(1713):012006.
28. Gromov V.E., Ivanov I.F., Zagulyaev D.V. et al. Evolution of the structure and properties of AK10M2N silumin under irradiation with a high-intensity pulsed electron beam. *Neorganicheskie materialy* [Inorganic Materials]. 2018;54(12):1372-1378. (In Russ.)
29. Ivanov Yu., Klopotov A., Potekaev A., Koval N., Vlasov V. Electron-ion-plasma modification of the structure and properties of commercial steels. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017;(168):012070.
30. Zagulyaev D., Gromov V., Konovalov S. Electron-ion-plasma modification of a hypereutectic Al-Si Alloy (1st Edition). CRC Press; 2020.
31. Gromov V.E., Zagulyaev D.V., Ivanov Yu.F., Konovalov S.V., Nevskiy S.A., Sarychev V.D., Budovskikh E.A., Rubannikova Yu.A. *Struktura i uprochnenie silumina, modifitsirovannogo elektronno-ionnoy plazmoy: monografiya* [Structure and strengthening of silumin modified with electron-ion-plasma processing: monograph]. Novokuznetsk: Siberian State Industrial University; 2020. 287 p. (In Russ.)
32. ISO 6892-1:2016 Metallic materials – Tensile testing – Part 1: Method of test at room temperature. 2016. 79 p.
33. Inkson B.J. Scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM) for materials characterization. Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods; Elsevier Ltd. 2016;17-43.
34. Primig S., Theska F., Haghdadi N. Electron microscopy methods. Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys; Elsevier. 2021;203-211.
35. Kuo J. Electron microscopy: Methods and protocols (3rd ed.). Humana Press, Totowa, NJ; 2014. 799 p.
36. Zagulyaev D.V., Ivanov Yu.F., Klopotov A.A., Ustinov A.M., Shlyarov V.V., Yakupov D.F. Evolution of strength properties and defect sub-structure of the hypoeutectic A319.0 alloy irradiated by a pulsed electron beam and fractured under tensile stress. Materials. 2021;20:101223.
37. Zbigniew H., Stachurski Z., Wang G., Tan X. Plastic deformation and yield strength of metals. An Introduction to Metallic Glasses and Amorphous Metals. 2021;235-312.
38. Chung K., Lee M.-G. Basics of continuum plasticity: Plasticity characteristics (in simple tension/compression). Springer; 2018;23-42.
39. Serebryakova A.A., Zagulyaev D.V., Shlyarova Yu.A., Ivanov Yu.F., Ustinov A.M. Dynamics of elemental and phase composition of the surface of AK5M2 alloy modified with Ti and irradiated by an electron beam. Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2022;16(6):1081-1088.
40. Gerasimova L.P., Ezhov A.A., Maresev M.I. *Izlomy konstruktsionnykh splavov: spravochnik* [Fracture of

- structural alloys: reference guide]. Moscow: Metallurgiya; 1987. 272 p. (In Russ.)
41. Chegurov M.K., Sorokina S.A. *Osnovy fraktograficheskogo analiza izlomov obraztsov iz konstruktivnykh*

splavov: ucheb. posobie [Basics of an analysis of fracture of structural alloy samples: study guide]. Nizhny Novgorod: Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University; 2018. 79 p. (In Russ.)

Поступила 02.12.2022; принята к публикации 03.02.2023; опубликована 27.03.2023
Submitted 02/12/2022; revised 03/02/2023; published 27/03/2023

Серебрякова Анна Александровна – аспирант кафедры ЕНД имени профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.
Email: aserebrakova87@gmail.com. ORCID 0000-0003-3979-7777

Загуляев Дмитрий Валерьевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры ЕНД имени профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия. Email: zagulyaev_dv@physics.sibsiu.ru. ORCID 0000-0002-9859-8949

Шляров Виталий Владиславович – аспирант кафедры ЕНД имени профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.
Email: ShlyarovVitaly@yandex.ru. ORCID 0000-0001-8130-648X

Шлярова Юлия Андреевна – аспирант кафедры ЕНД имени профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.
Email: rubannikova96@mail.ru. ORCID 0000-0001-5677-1427

Иванов Юрий Федорович – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники, Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия.
Email: yufi55@mail.ru. ORCID 0000-0001-8022-7958

Устинов Артем Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций, Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия.
Email: artemustinov@bk.ru. ORCID 0000-0002-3461-2086

Anna A. Serebryakova – postgraduate student of the Finkel Department of Natural Science, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.
Email: aserebrakova87@gmail.com. ORCID 0000-0003-3979-7777

Dmitriy V. Zagulyaev – PhD (Eng.), Associate Professor of the Finkel Department of Natural Science, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.
Email: zagulyaev_dv@physics.sibsiu.ru. ORCID 0000-0002-9859-8949

Vitaliy V. Shlyarov – postgraduate student of the Finkel Department of Natural Science, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.
Email: ShlyarovVitaly@yandex.ru. ORCID 0000-0001-8130-648X

Yulia A. Shliarova – postgraduate student of the Finkel Department of Natural Science, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.
Email: rubannikova96@mail.ru. ORCID 0000-0001-5677-1427

Yury F. Ivanov – DrSc (Physics and Mathematics), Professor, Chief Researcher of the Laboratory of Plasma Emission Electronics of the Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia.
Email: yufi55@mail.ru. ORCID 0000-0001-8022-7958

Artem M. Ustinov – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Metal and Wooden Structures, Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia.
Email: artemustinov@bk.ru. ORCID 0000-0002-3461-2086

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

УДК 621.914.1

DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-1-45-54



ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РОБОТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПЕРАЦИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ВРАЩАЮЩИМИСЯ ИНСТРУМЕНТАМИ

Гузеев В.И., Сергеев С.В., Нуркенов А.Х., Батуев В.В., Сергеев Ю.С., Нестерюк Е.В.

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). В настоящее время в промышленности применяются промышленные роботы в составе роботизированных комплексов для обработки крупногабаритных деталей, изготавливаемых из композитных материалов и металлов. Например, приборные панели электровозов, корпуса пространственно-сложной формы и т.д. Существующие методы проектирования операции механической обработки вращающимися инструментами на базе роботизированных комплексов основаны на эмпирическом подборе режимов резания для каждого конкретного изделия и ограничены в универсальности применения. Отсутствие методик обоснованного назначения режимов резания и выбора режущего инструмента, учитывающих оценку колебательно-го процесса в технологической системе в процессе обработки на базе роботизированных комплексов негативно сказывается как на производительности обработки (занижение режимов обработки с целью обеспечения точности и качества), так и на время внедрения детали в производство. **Используемые методы.** В работе произведены исследования колебательных процессов в технологической системе и возможности их учета при разработке методики проектирования операции механической обработки вращающимися инструментами на базе роботизированного комплекса. **Новизна.** Произведено исследование колебаний роботизированного комплекса в процессе обработки крупногабаритных нежестких деталей вращающимся инструментом с целью определения жесткости технологической системы. **Результат.** Определена зависимость колебаний на шпинделе промышленного робота на микроперемещения заготовки, что позволило произвести расчет жесткости технологической системы роботизированного комплекса. **Практическая значимость.** Произведенные исследования позволяют определять жесткость технологической системы роботизированного комплекса путем тестовой обработки деталей, что позволит в дальнейшем назначать режимы резания, обеспечивающие заданную точность при максимальной производительности.

Ключевые слова: механическая обработка, вращающийся инструмент, роботизированный комплекс, колебательный процесс, микроперемещения, промышленный робот, фрезерование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-20067, <https://rscf.ru/project/22-29-20067/>.

© Гузеев В.И., Сергеев С.В., Нуркенов А.Х., Батуев В.В., Сергеев Ю.С., Нестерюк Е.В., 2023

Для цитирования

Исследование колебаний технологической системы роботизированного комплекса для реализации методики проектирования операции механической обработки вращающимися инструментами / В.И. Гузеев, С.В. Сергеев, А.Х. Нуркенов, В.В. Батуев, Ю.С. Сергеев, Е.В. Нестерюк // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №1. С. 45-54. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-45-54>



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

STUDY ON OSCILLATIONS OF THE TECHNOLOGICAL SYSTEM OF A ROBOTIC COMPLEX TO IMPLEMENT THE TECHNIQUE OF DESIGNING ROTARY MACHINING OPERATIONS

Guzeev V.I., Sergeev S.V., Nurkenov A.Kh., Batuev V.V., Sergeev Yu.S., Nesteryuk E.V.

South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). Currently, industrial robots are used in the industry as part of robotic complexes for machining large-sized parts made from composite materials and metals. For example, control panels of electric locomotives, three-dimensional curved shells, etc. The existing methods for designing a rotary machining operation based on robotic complexes follow the empirical selection of cutting conditions for every specific product; therefore, they are limited in their versatility. The lack of methods for the reasonable assignment of cutting modes and the choice of a cutting tool, taking into account the assessment of the oscillatory process in the technological system during machining on the basis of robotic complexes, negatively influences both the output of machining (downgrading of machining modes in order to ensure accuracy and quality) and time required to introduce the parts into production. **Methods Applied.** The paper studies the oscillatory processes in the technological system and the possibility of taking them into account when developing a methodology for designing a machining operation with rotating tools based on a robotic complex. **Originality.** A study examined oscillations of a robotic complex during rotary machining of large-sized non-rigid parts with a rotating tool in order to determine rigidity of the technological system. **Result.** The authors determined the dependence between oscillations on the spindle of an industrial robot and micro-displacements of the workpiece, contributing to calculating rigidity of the technological system of the robotic complex. **Practical Relevance.** The research carried out makes it possible to determine rigidity of the technological system of the robotic complex by test machining of parts, which will contribute to a subsequent assignment of cutting modes that provide the specified accuracy at maximum performance.

Keywords: machining, rotating tool, robotic complex, oscillatory process, micro-displacements, industrial robot, milling

The research was funded by the grant from the Russian Science Foundation, No. 22-29-20067, <https://rscf.ru/project/22-29-20067/>.

For citation

Guzeev V.I., Sergeev S.V., Nurkenov A.Kh., Batuev V.V., Sergeev Yu.S., Nesteryuk E.V. Study on Oscillations of the Technological System of a Robotic Complex to Implement the Technique of Designing Rotary Machining Operations. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 1, pp. 45-54. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-45-54>

Введение

Современные машиностроительные предприятия для механической обработки изделий активно используют промышленных роботов, оснащенных инструментальными шпинделями [1-8]. Гибкая переналадка оборудования, габаритные размеры и параметры рабочей зоны позволяют их эффективно использовать для обработки нежестких конструкций из композитных материалов и металлов. Однако анализ научных источников показал, что технологические решения имеют частный характер и не могут служить в качестве универсальных рекомендаций для обработки широкой номенклатуры машиностроительной продукции с использованием такого прогрессивного оборудования, как промышленные роботы, оснащенные инструментальными шпинделями. Вместе с этим из-за недостаточной изученности колебательных процессов, возникающих в процессе работы данного оборудования, и их влияния на точ-

ность и качество обрабатываемых деталей [9-20] отсутствуют рекомендации по научно обоснованному назначению режимов резания, выбору режущего инструмента и т.д. Следовательно, проектные решения далеки от совершенства и приводят к значительному увеличению этапа внедрения деталей в производство, связанному с поиском различных технологических решений, позволяющих обеспечить требуемые параметры точности и качества обрабатываемых деталей.

Ранее реализованное авторами экспериментальное исследование позволило установить, что жесткость технологической системы изменяется в широком диапазоне [21]. При этом жесткость детали при импульсной нагрузке отличается от жесткости при обработке вращающимся инструментом не менее чем на порядок, а жесткость шпинделя при обработке вращающимся инструментом отличается от жесткости детали не менее чем на два порядка. Это оказывает значительное влияние на точность и качество изготавливаемых

деталей, особенно при обработке крупногабаритных нежестких деталей. Исходя из этого, разработка рекомендаций по назначению режимов резания, основанных на учете математического моделирования жесткости элементов технологической системы, при обработке заготовок вращающимся инструментом в условиях нежесткой технологической системы роботизированного комплекса является актуальной задачей.

Таким образом, целью данной работы являлось исследование колебаний технологической системы роботизированного комплекса и их влияния на ее жесткость для последующей разработки рекомендаций по выбору технологических параметров, обеспечивающих требуемую точность и качество изготовления деталей с обеспечением заданной производительности.

Материалы и методы исследования

Оценка колебательного процесса элементов технологической системы производилась путем тестового определения вибраций на шпинделе роботизированного комплекса и косвенной оценки микроперемещений на образце. Для этого проведен ряд экспериментов с проверкой гипотезы о возможности измерения вибраций на детали. Показания колебаний снимались при помощи датчика, закрепленного на шпинделе роботизированного комплекса KUKA. Для проведения эксперимента спроектировано приспособление для базирования и закрепления образцов, обеспечивающее требуемое положение относительно системы координат поворотного стола роботизированного комплекса (рис. 1). Обработка образцов производилась последовательным фрезерованием окон и стенок в различных направлениях (рис. 2). Режимы резания назначены в соответствии со справочными нормативами от производителя инструмента Cerin (табл. 1).

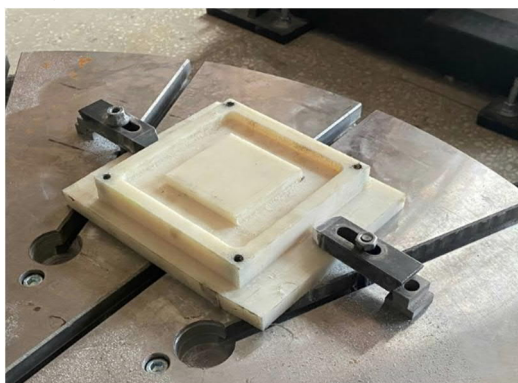
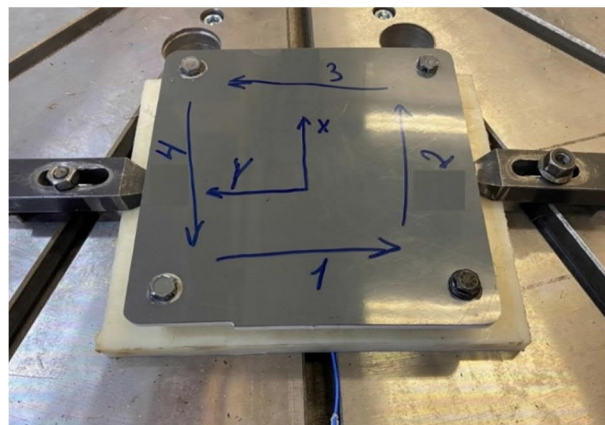
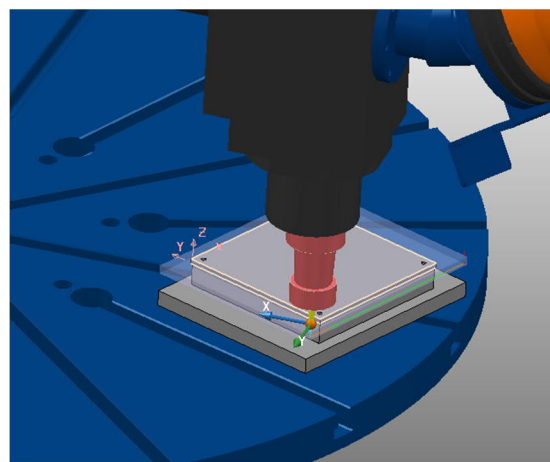


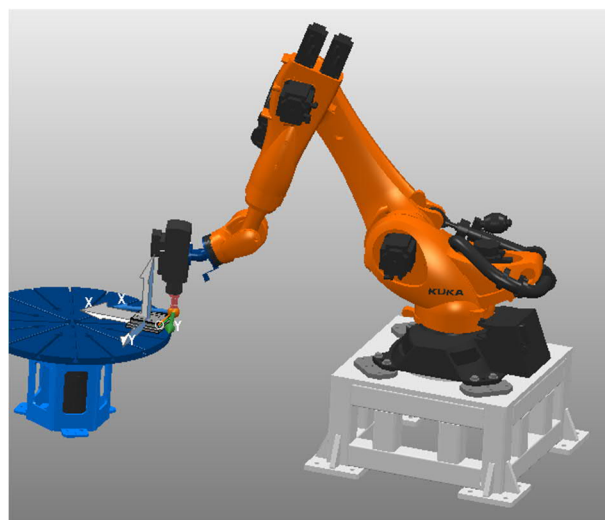
Рис. 1. Станочное приспособление для обработки образцов на роботизированном комплексе
Fig. 1. A machine tool for machining samples on a robotic complex



а



б



в

Рис. 2. Моделирование обработки: а – схема обработки образцов; б – участок обработки в САМ-системе; в – общий вид роботизированного комплекса

Fig. 2. Machining simulation: a is a sample machining diagram, b is a machining area in the CAM system, c is a general view of the robotic complex

Таблица 1. Режимы резания инструмента Cerin
Table 1. Cutting modes of the Cerin tool

Наименование параметра	Режимы резания
Скорость резания V_c	160 м/мин
Минутная подача F	800 мм/мин
Глубина фрезерования t	3 мм

В ходе эксперимента главной задачей было измерение параметров виброускорений на образце и шпинделе в процессе обработки. Для замеров амплитудно-частотных характеристик использовались акселерометры, закрепленные на шпинделе промышленного робота и станочном приспособлении (рис. 3). Измерения производились в системе координат оборудования по осям X, Y.

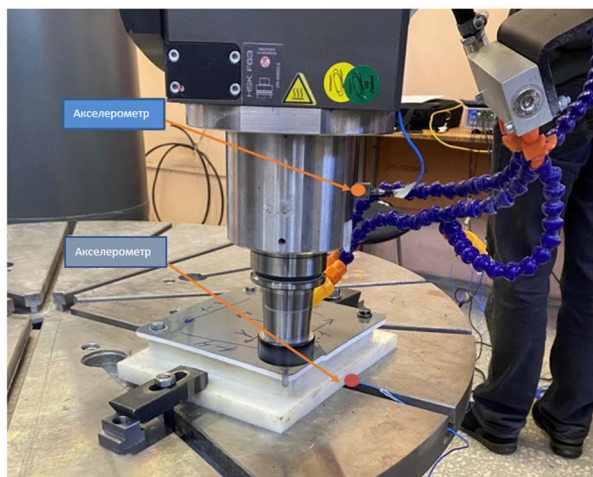


Рис. 3. Схема установки акселерометров на экспериментальной установке
Fig. 3. A scheme of installation of accelerometers on the experimental facility

Полученные результаты и их обсуждение

В ходе проведения экспериментов получены диаграммы виброускорений, возникающих на шпинделе промышленного робота и образце (рис. 4). С целью дальнейшего анализа результатов измерений произведена их статистическая обработка.

Обработка результатов измерений осуществлялась в следующем порядке:

1. Сравнивались предельные максимальные значения на диаграммах x_1 и x_2 в интервале по 20 секунд (x_1 – максимум на образце, x_2 – мак-

симум на шпинделе).

2. Определялись отношения максимального значения x_1 на максимальный x_2 в каждом интервале k_1 :

$$\frac{x_1 i}{x_2 i} = k i. \quad (1)$$

3. Находилась среднее значение коэффициента корреляции:

$$k i_{cp} = \frac{k i}{15}, \quad (2)$$

где $k i_{cp}$ – среднее значение коэффициента корреляции.

По результатам обработанных измерений построены графики изменения колебаний технологической системы на шпинделе промышленного робота и образце (рис. 5). Из графиков видно значительный всплеск амплитуды колебаний в начальный момент измерения, который обусловлен предельными вибрациями, возникающими в процессе врезания вращающегося инструмента в образец и стабилизирующимися в дальнейшем при стабилизации условий резания.

Для оценки микроперемещений на шпинделе и образце под действием силы резания произведено преобразование по методу Фурье. Результаты показали средние значения микроперемещений (табл. 2) и жесткости образца и шпинделя (табл. 3).

Анализ результатов показал, что жесткость образца отличается от жесткости шпинделя в процессе обработки на один порядок. Из этого следует, что необходимо учитывать данную разницу на стадии тестовой обработки.

С целью автоматизации обработки результатов измерений разработан алгоритм (рис. 6) и программный модуль для расчета микроперемещений на образце и шпинделе роботизированного комплекса, который позволяет в автоматическом режиме по заданным пользователем амплитудно-частотным характеристикам (в виде массивов данных) производить расчет и строить графики значений декремента затухания колебаний.

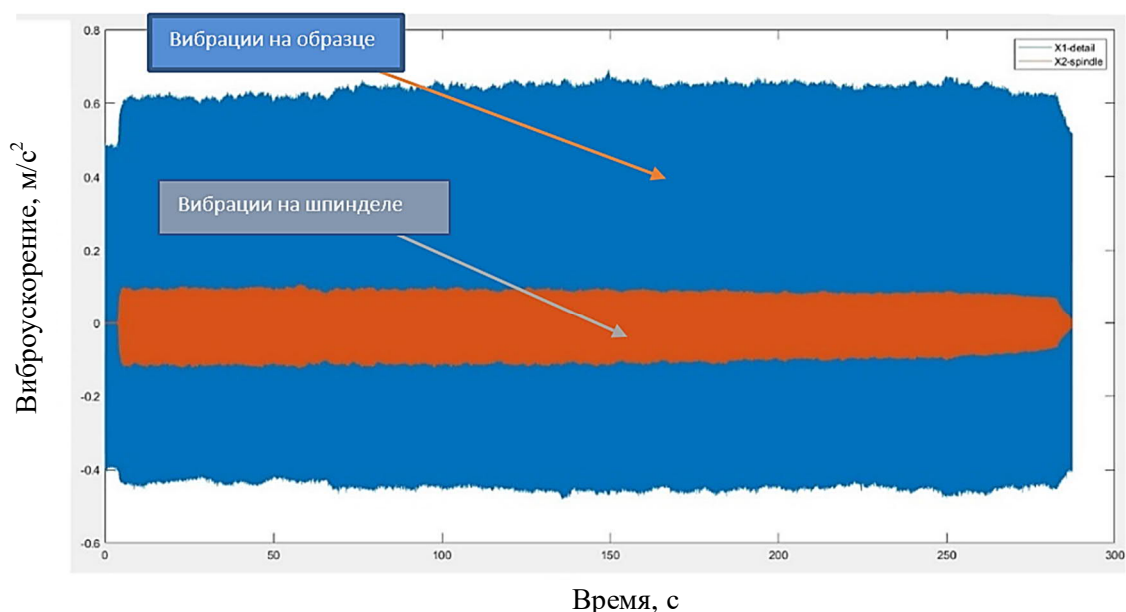


Рис. 4. Диаграмма виброускорений при обработке детали вращающимся инструментом на роботизированном комплексе

Fig. 4. A diagram of vibration accelerations when machining a part with a rotating tool on the robotic complex

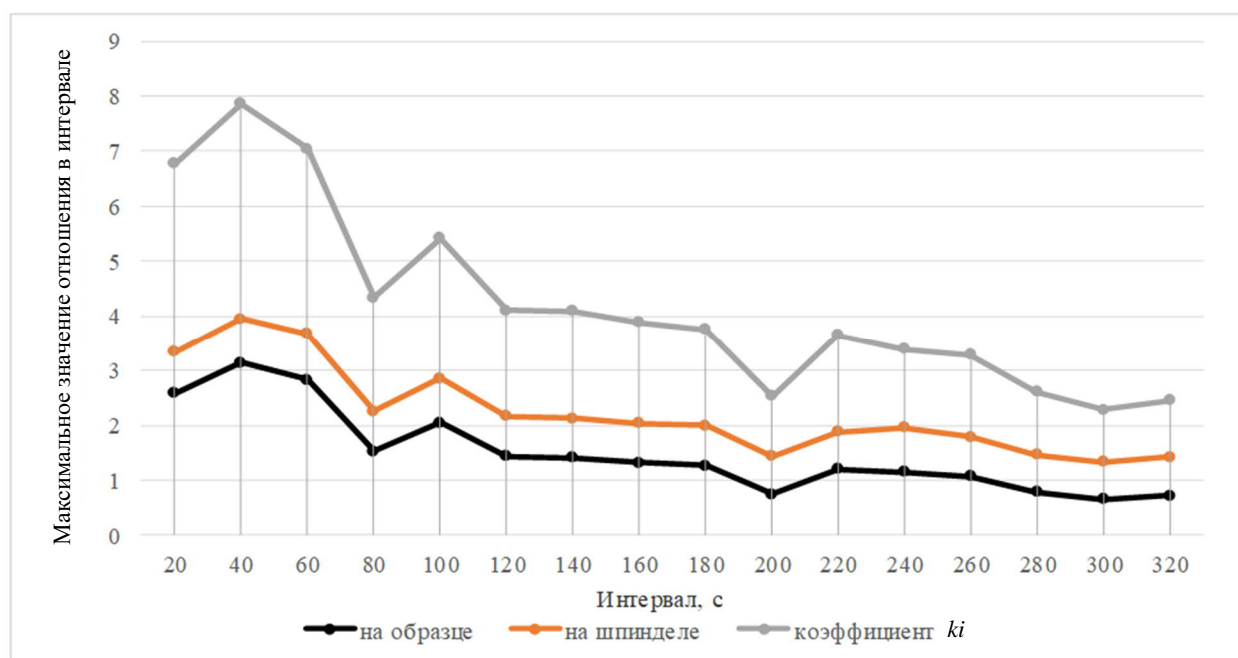


Рис. 5. Графики изменения колебаний рассматриваемых элементов технологической системы

Fig. 5. Graphs of changes in oscillations of the technological system components under study

Таблица 2. Средние значения микроперемещений образца и шпинделя промышленного робота
Table 2. Average values of micro-displacements of the sample and the spindle of an industrial robot

Номер направления	Среднее значение микроперемещений, мм	
	на образце	на шпинделе
1	0,2364	0,0490
2	0,3752	0,0400
3	0,4075	0,0624
4	0,3774	0,0251

Таблица 3. Средние значения жесткости образца и шпинделя промышленного робота
Table 3. Average stiffness values of the sample and the spindle of an industrial robot

Номер направления	Среднее значение жесткости, Н/м	
	образца	шпинделя
1	$1,91 \cdot 10^6$	$1,89 \cdot 10^7$
2	$2,11 \cdot 10^6$	$2,19 \cdot 10^7$
3	$1,50 \cdot 10^6$	$1,80 \cdot 10^7$
4	$2,36 \cdot 10^6$	$1,79 \cdot 10^7$

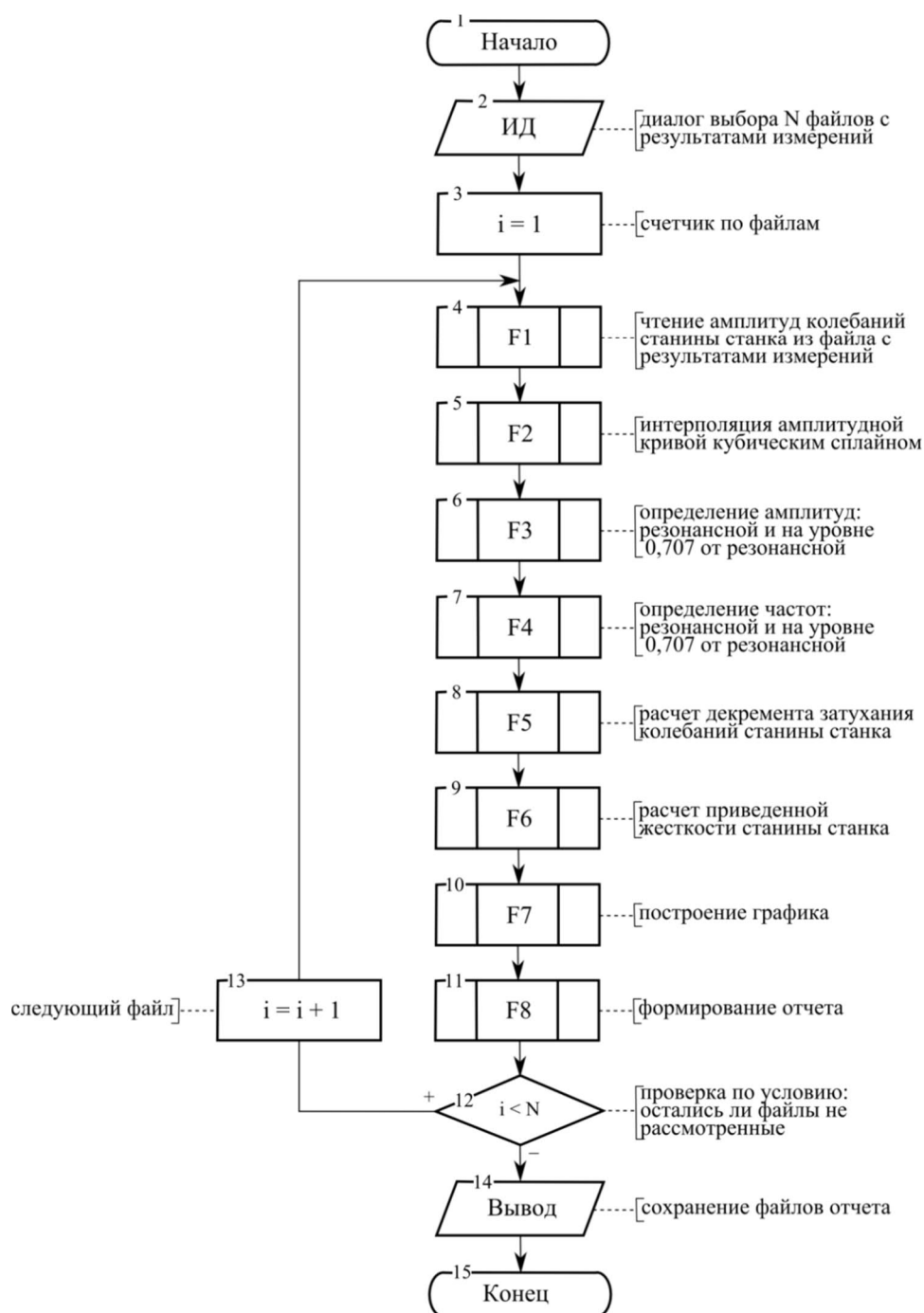


Рис. 6. Алгоритм программного модуля в C#
Fig. 6. POU algorithm in C#

В блоках алгоритма выполняются следующие действия:

1 – задаются начальные значения параметров состояния программы;

2 блок – происходит ввод исходных данных – выбор текстовых файлов с результатами измерений, которые будут обрабатываться в программном модуле;

3-13 блоки – отрабатывается итеративный цикл в соответствии с файлами с результатами измерений из перечня исходных данных;

4 блок – открывается табличный файл с результатами измерений и из него считываются амплитуды в массив внутренней памяти приложения;

5 блок – данные этого массива интерполируются кубическим сплайном кусочно-линейной функции, построенной по точкам с координатами амплитуды и частоты;

6 блок – определяется резонансная (пиковая) амплитуда и амплитуда, величина которой равна 0,707 от резонансной;

7 блок – определяются частоты, при которых резонансная кривая пересекает горизонтальные линии на уровне резонансной амплитуды и 0,707 от нее;

8 блок – производится расчет декремента затухания по величине резонансной амплитуды и ширине интервала на уровне 0,707 от резонансного пика;

9 блок – рассчитывается жесткость детали;

10 блок – строятся графики кусочно-линейной функции и функции интерполяции кубическим сплайном, вертикальные и горизонтальные линии, проходящие через точку резонансной амплитуды и точку амплитуды 0,707 от резонансной;

11 блок – формируется страница отчета в Microsoft Word, включая вывод исходных данных, комплекса графиков функций и результатов расчетов;

14 блок – в исходную папку приложения сохраняется файл с отчетом о результатах измерений амплитудно-частотных характеристик, а также основные результаты вычислений;

15 блок – завершаются все процессы приложения и оно закрывается.

Заключение

Таким образом, в соответствии с целью эксперимента установлено:

1. Жесткость образца при обработке вращающимся инструментом отличается от жесткости шпинделя более чем в 10 раз, что вызывает необходимость учета этих параметров при проектировании технологической операции.

2. По значениям жесткости технологической системы определены значения микроперемещений на образце и шпинделе, что позволяет использовать их на этапе подготовки производства для назначения рациональных режимов резания, обеспечивающих заданные точность и качество обрабатываемой детали.

3. Для определения жесткости конкретной технологической системы роботизированного комплекса и дальнейшего использования полученных данных при расчете режимов резания предлагается тестовая обработка образца по приведенной выше методике.

4. Для автоматизации процесса обработки данных, полученных в результате тестовой обработки образца, разработан программный модуль.

С целью формирования базы знаний параметров жесткости роботизированных комплексов следует формировать массивы данных для различных типов заготовок и обрабатываемых материалов, что позволит в дальнейшем производить машинное обучение системы проектирования технологической подготовки производства.

Список источников

1. Афонин В.Л. Робототехнические комплексы для финишной обработки пера лопаток ГТД // Экстремальная робототехника. 2017. №1. С. 382-386.
2. Интеллектуальный робототехнический комплекс для финишной обработки проточной части лопаток газотурбинных двигателей / В.Л. Афонин, Ю.В. Илюхин, М.Г. Яковлев и др. // Вестник МГТУ «Станкин». 2019. №3. С. 49-56.
3. Горисев С.А., Ефременко А.П. Возможности САМ-системы Autodesk PowerMill 2018 в машиностроении // Технология машиностроения и материаловедение. 2018. №2. С. 6-8.
4. Изготовление литейного модельного комплекта с применением станка-робота FANUC / Л.Г. Саранин, П.И. Маленко, С.К. Захаров, Д.К. Белов, О.В. Костыгова // Известия Тульского университета. Технические науки. 2018. №12. С. 519-527.
5. Рассказчиков Н.Г. Применение промышленных роботов на операциях абразивной зачистки // Мехатроника, автоматика и робототехника. 2019. №3. С. 10-13.
6. Дударев А.С. Инновационное применение роботов для производства изделий из полимерных композиционных материалов // СТИН. 2018. №10. С. 2-6.
7. Perez R., Gutiérrez S.C., Zotovic R. A study on robot arm machining: Advance and future challenges // 29th International DAAAM Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation. Croatia: Danube Adria Association for Automation and Manufacturing. 2018, pp. 931-940.

8. Bo T., XingWei Z., Han D. Mobile-robotic machining for large complex components: A review study // Science China Technological Sciences. 2019, vol. 62, no. 8, pp. 1388-1400.
9. Iglesias I., Ares J.E., González-Gaya C., Morales F., Rosales V.F. Predictive Methodology for Dimensional Path Precision in Robotic Machining Operations // IEEE Access. 2018, vol. 6, no. 3, pp. 49217-49223.
10. Peng J.F., Ding Y., Zhang G., Ding H. Smoothness-oriented path optimization for robotic milling processes // Science China Technological Sciences. 2020, vol. 63, no. 9, pp. 1751-1763.
11. Экспериментальные исследования жёсткости станка-робота / Б.А. Еникеев, А.Р. Сайдуганов, О.К. Акмаев, Р.Г. Кудояров // Станкостроение и инновационное машиностроение: материалы всероссийской научно-технической конференции. Уфа: Изд-во УГАТУ, 2019. С. 273-276.
12. Бутенко В.И., Давыдова И.В., Атоян Т.В. Влияние динамической жёсткости технологического робота на качество обработанной поверхности детали // Вестник Брянского государственного технического университета. 2019. №2(75). С. 21-27.
13. Кудояров Р.Г., Фецак С.И., Башаров Р.Р. Методика измерений виброустойчивости станка-робота // Станкостроение и инновационное машиностроение: материалы всероссийской научно-технической конференции. Уфа: Изд-во УГАТУ, 2019. С. 292-296.
14. He F.-X., Liu Y., Liu K. A chatter-free path optimization algorithm based on stiffness orientation method for robotic milling // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019, vol. 101, no. 9-12, pp. 2739-2750.
15. Mamedov S., Popov D., Mikhel S., Klimchik A. Increasing Machining Accuracy of Industrial Manipulators Using Reduced Elastostatic Model // Lecture Notes in Electrical Engineering. 2020, vol. 613, pp. 384-406.
16. Klimchik A., Pashkevich A., Chablat D. MSA-technique for stiffness modeling of manipulators with complex and hybrid structures // IFAC-PapersOnLine. 2018, vol. 51, no. 22, pp. 37-43.
17. Габитов А.А., Каляшина А.В. Анализ обеспечения точности позиционирования промышленных роботов // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2018. №4. С. 49-54.
18. Измерение собственных и вынужденных частот робота-станка и станка модели 500V/5 / А.Ф. Гаймалов, Б.А. Еникеев, А.Н. Типеев, С.И. Фецак, Ю.В. Идрисова // Станкостроение и инновационное машиностроение: материалы всероссийской научно-технической конференции. Уфа: Изд-во УГАТУ, 2019. С. 318-224.
19. Barnfather J.D., Goodfellow M.J., Abram T. Achievable tolerances in robotic feature machining operations using a low-cost hexapod // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018, vol. 95, no. 1-4, pp. 1421.
20. Xiong G., Ding Y., Zhu L. Stiffness-based pose optimization of an industrial robot for five-axis milling // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2019, vol. 55, pp. 19-28.
21. Экспериментальное исследование жёсткости технологической системы на базе промышленного робота KUKA KR 300 R2500 ULTRA / Нуркенов А.Х., Гузеев В.И., Батуев В.В., Нестерюк Е.В., Павлов С.А. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2022. Т. 22. № 1. С. 48-58.

References

1. Afonin V.L. Robotic complexes for finishing of gas-turbine engine blades. *Ekstremalnaya robototekhnika* [Extreme Robotics]. 2017;(1):382-386. (In Russ.)
2. Afonin V.L., Ilyukhin Yu.V., Yakovlev M.G. et al. The intelligent robotic complex for finishing the flow path of the blades of gas-turbine engines. *Vestnik MGTU Stankin* [Bulletin of STANKIN Moscow State University of Technology]. 2019;(3):49-56. (In Russ.)
3. Gorisev S.A., Efremenko A.P. Autodesk PowerMill 2018 capabilities in mechanical engineering. *Tekhnologiya mashinostroeniya i materialovedeniya* [Mechanical Engineering Technology and Materials Science]. 2018;(2):6-8. (In Russ.)
4. Saranin L.G., Malenko P.I., Zakharov S.K., Belov D.K., Kostygova O.V. Manufacturing a casting and molding set using a FANUC robot]. *Izvestiya Tul'skogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula University. Engineering Sciences]. 2018;(12):519-527. (In Russ.)
5. Rasskazhnikov N.G. The use of industrial robots in abrasive cleaning operations]. *Mekhatronika, avtomatika i robototekhnika* [Mechatronics, Automation and Robotics]. 2019;(3):10-13. (In Russ.)
6. Dudarev A.S. Innovative application of robots for the production of products from polymer composite materials. *STIN* [Machines and Tools]. 2018;(10):2-6. (In Russ.)
7. Perez R., Gutiérrez S.C., Zotovic R. A study on robot arm machining: Advance and future challenges. 29th International DAAAM Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation. Croatia: Danube Adria Association for Automation and Manufacturing. 2018;931-940.
8. Bo T., XingWei Z., Han D. Mobile-robotic machining for large complex components: A review study. Science China Technological Sciences. 2019;62(8):1388-1400.
9. Iglesias I., Ares J.E., González-Gaya C., Morales F., Rosales V.F. Predictive methodology for dimensional path precision in robotic machining operations. IEEE Access. 2018;6(3):49217-49223.
10. Peng J.F., Ding Y., Zhang G., Ding H. Smoothness-oriented path optimization for robotic milling processes. Science China Technological Sciences. 2020;63(9):1751-1763.

11. Enikeev B.A., Sayduganov A.R., Akmaev O.K., Kudoyarov R.G. Experimental studies on rigidity of a robot machine. Machine Tool Building and Innovative Mechanical Engineering: Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference. Ufa: Ufa State Aviation Technical University; 2019;273-276. (In Russ.)
12. Butenko V.I., Davydova I.V., Atoyan T.V. Influence of dynamic rigidity of a technological robot on the quality of the machined surface of parts. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Bryansk State Technical University]. 2019;(2(75)):21-27. (In Russ.)
13. Kudoyarov R.G., Fetsak S.I., Basharov R.R. A method for measuring the vibration resistance of a robot machine]. Machine Tool Building and Innovative Mechanical Engineering: Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference. Ufa: Ufa State Aviation Technical University; 2019;292-296. (In Russ.)
14. He F.-X., Liu Y., Liu K. A chatter-free path optimization algorithm based on stiffness orientation method for robotic milling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019;101(9-12):2739-2750.
15. Mamedov S., Popov D., Mikhel S., Klimchik A. Increasing machining accuracy of industrial manipulators using reduced elastostatic model. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2020;613:384-406.
16. Klimchik A., Pashkevich A., Chablat D. MSA-technique for stiffness modeling of manipulators with complex and hybrid structures. *IFAC-PapersOnLine*. 2018;51(22):37-43.
17. Gabitov A.A., Kalyashina A.V. Analysis of ensuring positioning accuracy of industrial robots. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva* [Bulletin of Tupolev Kazan State Technical University]. 2018;(4):49-54. (In Russ.)
18. Gaimalov A.F., Enikeev B.A., Tipeev A.N., Fetsak S.I., Idrisova Yu.V. Measurement of natural and forced frequencies of a robot machine and the 500V/5 model machine. Machine Tool Building and Innovative Mechanical Engineering: Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference. Ufa: Ufa State Aviation Technical University; 2019;318-324. (In Russ.)
19. Barnfather J.D., Goodfellow M.J., Abram T. Achievable tolerances in robotic feature machining operations using a low-cost hexapod. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018;95(1-4): 1421-1436.
20. Xiong G., Ding Y., Zhu L. Stiffness-based pose optimization of an industrial robot for five-axis milling. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2019;55:19-28.
21. Nurkenov A.Kh., Guzeev V.I., Batuev V.V., Nesteruk E.V., Pavlov S.A. Experimental study on rigidity of a technological system based on KUKA KR 300 R2500 ULTRA industrial robot. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroyeniye* [Bulletin of South Ural State University]. 2022;22(1):48-58. (In Russ.)

Поступила 16.12.2022; принята к публикации 17.01.2023; опубликована 27.03.2023
Submitted 16/12/2022; revised 17/01/2023; published 27/03/23

Гузеев Виктор Иванович – доктор технических наук, профессор,
Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск, Россия.
Email: guzeevvi@susu.ru. ORCID 0000-0002-8277-1217

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

Нуркенов Антон Халилович – кандидат технических наук, доцент,
Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск, Россия.
Email: nurkenovah@susu.ru. ORCID 0000-0002-5832-031X

Батуев Виктор Викторович – кандидат технических наук, доцент,
Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск, Россия.
Email: batuevvv@susu.ru. ORCID 0000-0001-9969-4310

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

Нестерюк Егор Владимирович – аспирант,
Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск, Россия.
Email: e1g9o9r@mail.ru. ORCID 0000-0001-6955-7702

Viktor I. Guzeev – DrSc (Eng.), Professor,
South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia.
Email: guzeevvi@susu.ru. 0000-0002-8277-1217

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

Anton Kh. Nurkenov – PhD (Eng.), Associate Professor,
South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia.
Email: nurkenovah@susu.ru. 0000-0002-5832-031X

Viktor V. Batuev – PhD (Eng.), Associate Professor,
South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia.
Email: batuevvv@susu.ru. ORCID 0000-0001-9969-4310

Yury S. Sergeev – PhD (Eng.), Associate Professor,
South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia.
Email: sergeevys@susu.ru. ORCID 0000-0003-1028-8346

Egor V. Nesteryuk – postgraduate student,
South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia.
Email: elg9o9r@mail.ru. ORCID 0000-0001-6955-7702

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
 УДК 621.833.2(31)
 DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-1-55-64



ГЕОМЕТРИЯ РЕЗЦОВОЙ ГОЛОВКИ ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ ПРОФИЛЯ АРОЧНЫХ ЗУБЬЕВ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КОЛЕС

Сызранцев В.Н., Стариков А.И.

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Применение цилиндрических передач с арочными зубьями в приводах локомотивов, бортовых редукторов, верхних приводов буровых установок позволяетратно увеличить ресурс работы передач по сравнению с прямозубыми и косозубыми колесами. К настоящему времени предложено полтора десятка способов изготовления арочных зубьев цилиндрических колес, отличающихся инструментами и движениями формообразования. Наибольшие перспективы промышленного освоения производства цилиндрических передач с арочными зубьями имеет способ нарезания арочных зубьев резцовыми головками методом прерывистого деления на станках ЧПУ. В то же время исследования кинематических характеристик передач, зубья которых нарезаны данным способом, при работе в условиях наличия погрешностей, показали, что функция положения имеет пилообразную форму и зубья входят в зацепление с ударом. Для обеспечения приближенного характера зацепления необходимо выполнять профильную модификацию поверхности зуба путем использования резцовой головки с более сложной, нежели прямой круговой конус, производящей поверхностью. **Используемые методы.** Разработка математической модели производящей поверхности резцовой головки и формул для расчета ее геометрических характеристик выполнена на основе методов дифференциальной геометрии и методов теории пространственных зубчатых зацеплений. **Новизна.** Для круговой резцовой головки с производящей поверхностью в виде однополостного гиперболоида получены зависимости для координат радиус-вектора и орта нормали, главных кривизн точек поверхности. **Результат.** Разработанная математическая модель производящей поверхности резцовой головки позволяет при обработке вогнутой стороны арочного зуба цилиндрического колеса выполнять модификацию профиля арочных зубьев колес как для обкатного, так и полуобкатного варианта передач. **Практическая значимость.** Использование круговых резцовых головок с производящей поверхностью в виде однополостного гиперболоида позволяет путем модификации профиля арочного зуба обеспечить при наличии погрешностей взаимного положения колеса и шестерни в передаче приближенный характер зацепления арочных зубьев.

Ключевые слова: цилиндрические передачи, резцовая головка, арочные зубья, модификация профиля

© Сызранцев В.Н., Стариков А.И., 2023

Для цитирования

Сызранцев В.Н., Стариков А.И. Геометрия резцовой головки для модификации профиля арочных зубьев цилиндрических колес // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №1. С. 55-64. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-55-64>



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

CUTTER HEAD GEOMETRY TO MODIFY THE CYLINDRICAL WHEEL ARC TEETH PROFILE

Syzrantsev V.N., Starikov A.I.

Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The use of cylindrical gears with arc teeth in locomotive drives, final reduction gears, and upper drives of drilling rigs makes it possible to increase manifold the service life of gears in comparison with spur and helical gears. There are currently proposed ten and a half methods of manufacturing arc teeth of cylindrical gears, differing in tools and shaping movements. A method of cutting arc teeth with cutter heads using the irregular division method on CNC machines is most advanced for industrial manufacturing of cylindrical gears with arc teeth. At the same time, studies on kinematic characteristics of gears, whose teeth are cut in this way, when working under conditions of errors, have shown that the position function has a sawtooth shape, and the teeth clash when meshing. To ensure approximate gearing, it is necessary to perform a profile modification of the tooth flank by using a cutter head with a more complex generating surface, rather than a right circular cone. **Methods Applied.** A mathematical model of the cutter head generating surface and formulae for calculating its geometric characteristics were developed by applying differential geometry and spatial gearing theory methods. **Originality.** The authors obtained dependence for coordinates of a radius vector and a unit normal vector, principal curvature of surface points, for the arc cutter head with the generating surface as the one-sheet hyperboloid. **Result.** The developed mathematical model of the cutter head generating surface contributes to modifying the gear arc teeth profile for both generating gear and gearing with rectilinear flank toothing options, when processing the concave side of the arc tooth. **Practical Relevance.** The use of circular cutter heads with a one-sheet hyperboloid generating surface ensures approximate gearing by modifying the arc tooth profile subject to errors in the gear and pinion relative position.

Keywords: cylindrical gears, cutter head, arc teeth, profile modification

For citation

Syzrantsev V.N., Starikov A.I. Cutter Head Geometry to Modify the Cylindrical Wheel Arc Teeth Profile. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 1, pp. 55-64. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-55-64>

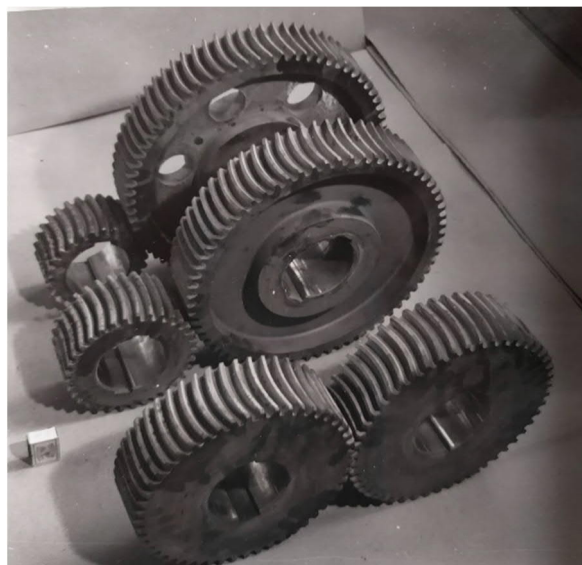
Введение

Эксплуатация цилиндрических зубчатых передач энергонасыщенных машин характеризуются как широким спектром передаваемой внешней нагрузки, так и существенными отклонениями положения зубьев колес в зацеплении от номинального, вызванных деформациями элементов корпуса и передач. В этих условиях прямозубые, косозубые и шевронные цилиндрические передачи требуемую нагрузочную способность и ресурс не обеспечивают. Решением данной проблемы является переход на передачи, зубья которых в продольном направлении имеют арочную форму (рис. 1, а). В результате более высокой изгибной прочности арочных зубьев, возможности компенсации негативного влияния угла перекоса и непараллельности путем определенной самоустановки колес при передаче нагрузки долговечность передач с арочными зубьями как по контактной, так и изгибной выносливости может быть кратно увеличена.

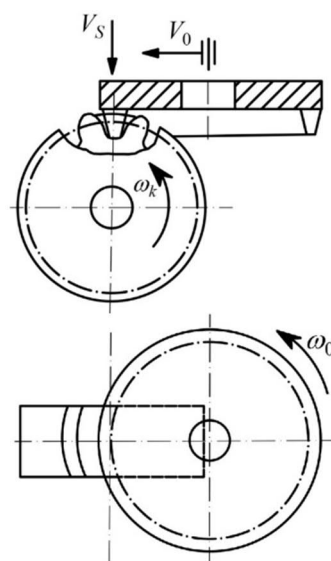
В последние несколько десятилетий исследованием способов изготовления арочных зубьев цилиндрических колес, геометрией их зацепле-

ния и расчетом нагрузочной способности за рубежом занимаются ученые различных стран [1-4]. К настоящему времени предложено более десятка способов формообразования арочных зубьев, отличающихся формообразующими движениями и применяемыми инструментами [1, 3]. Особенно широк перечень статей китайских ученых, где исследованием передач с арочными зубьями занимаются в нескольких университетах [5-11]. В СССР, начиная со второй половины прошлого века, и в дальнейшем в РФ по настоящее время отечественными учеными выполняются комплексные исследования цилиндрических передач [1, 2, 12-15].

Наибольшие перспективы внедрения в производство имеет способ нарезания арочных зубьев круговой резцовой головкой методом обката с единичным делением (рис. 1, б) [1, 2, 13]. В этом способе поступательное движение V_0 инструмента согласовано с вращением ω_k заготовки, деление прерывистое. Подача врезания V_s осуществляется за счет осевого перемещения инструмента, а скорость резания величиной ω_0 .



а



б

Рис. 1. Передачи с арочными зубьями (а) и расчетная схема нарезания зубьев резцовой головкой (б)
 Fig. 1. Gears with arc teeth (a) and the design diagram of toothing with a cutter head (б)

По аналогии с коническими передачами этим способом могут быть изготовлены полуобкатные цилиндрические передачи, когда колесо нарезается без обкатки, методом копирования [12, 15]. В работах как отечественных [1, 2, 13], так и зарубежных ученых [3, 4, 11, 16] показано, что обработка арочных зубьев цилиндрических колес данным способом возможна на четырехкоординатных станках с числовым программным управлением. Применяемые в способе резцовые головки широко используются при нарезании круговых зубьев конических колес, технология их изготовления и контроля хорошо отработана.

Учитывая вышеотмеченное с позиций реализации, данный способ имеет значимые технологические преимущества по сравнению с другими способами нарезания арочных зубьев цилиндрических колес [1, 3]. Проблемы способа заключаются в другом. Исследование геометрических характеристик зацепления арочных зубьев, нарезанных круговыми резцовыми головками, показали, что при отсутствии погрешностей изготовления и сборки колеса и шестерни передачи являются сопряженными. Ситуация изменяется принципиально как для обкатных, так и полуобкатных передач в случае их работы в условиях отклонений колеса и шестерни от номинальных положений, в результате которых активная действующая линия зацепления арочных зубьев

случайным образом смещается из среднего сечения зуба. Передаточная функция приобретает пилообразную форму, передача становится несопряженной и зубья в зацепление входят с ударом. Подобная ситуация известна в конических передачах и для обеспечения их работоспособности путем реализации приближенного характера зацепления зубьев необходимо решать задачу синтеза геометрии поверхностей круговых зубьев [14]. Возможности изменения геометрии арочных зубьев в рамках способа формообразования арочных зубьев резцовыми головками практически отсутствуют. Для решения задачи необходимо использовать более сложную, нежели прямой круговой конус, производящую поверхность резцовой головки.

Цель настоящей работы заключается в получении математических зависимостей для расчета проекций координат радиуса вектора и орта нормали производящей поверхности резцовой головки, позволяющей в рамках исследуемого способа нарезания арочных зубьев обеспечить приближенный характер их зацепления вследствие модификации профиля арочного зуба. Определение выражений для расчета главных кривизн производящей поверхности, необходимых при исследовании геометрических и кинематических характеристик зацепления арочных зубьев полуобкатного варианта цилиндрической передачи.

Материалы и методы исследования

Используемые для нарезания арочных зубьев колеса круговые резцовые головки содержат резцы с прямолинейными режущими кромками, расположенными в плоскости, проходящей через ось вращения резцовой головки [1-3, 13]. Для профильной модификации поверхности зуба колеса используем более сложную поверхность однополостный гиперболоид, которая образуется вращением вокруг оси резцовой головки прямолинейной режущей кромки, расположенной в плоскости параллельной оси вращения и отстоящей от нее на величину δ (рис. 2).

Для определения проекций координат x_p, y_p, z_p радиус-вектора $\vec{r}_p(x_p, y_p, z_p)$ производящей поверхности воспользуемся матричным выражением [12, 15]:

$$\tilde{r}_p(u, \vartheta) = \tilde{A}_{p,k}(\vartheta) \tilde{r}_k(u). \quad (1)$$

В формуле (1) $\tilde{r}_k(u)$, $\tilde{r}_p(u, \vartheta)$ – матрицы-столбцы, составленные из координат соответственно радиус-векторов \vec{r}_k : $x_k = u$, $y_k = 0$, $z_k = 0$, где u – линейный параметр прямолинейной кромки, и \vec{r}_p : x_p, y_p, z_p ; $\tilde{A}_{p,k}(\vartheta)$ – матрица перехода четвертого порядка, описывающая переход из системы координат $S_k(x_k, y_k, z_k)$, жестко связанной с режущей кромкой, в систему координат $S_p(x_p, y_p, z_p)$, жестко связанную с резцовой головкой, поворачивающейся на угол ϑ (угловой параметр производящей поверхности) вокруг оси y_p (см. рис. 2).

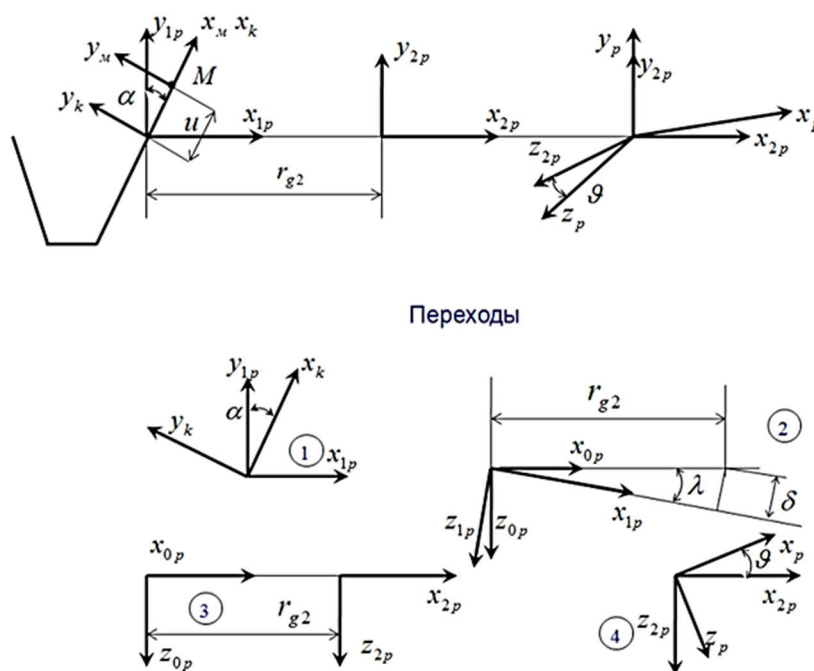


Рис. 2. Системы координат для описания производящей поверхности
Fig. 2. Coordinate systems used to describe the generating surface

На основании построений на рис. 2 матрица $\tilde{A}_{p,k}(\vartheta)$ имеет следующий вид:

$$\tilde{A}_{p,k}(\vartheta) = \begin{pmatrix} \cos(\vartheta + \lambda) \sin \alpha; & -\cos(\vartheta + \lambda) \cos \alpha; & -\sin(\vartheta + \lambda); & -r_{g2} \cos \vartheta; \\ \cos \alpha; & \sin \alpha; & 0; & 0; \\ \sin(\vartheta + \lambda) \sin \alpha; & -\sin(\vartheta + \lambda) \cos \alpha; & \cos(\vartheta + \lambda); & -r_{g2} \sin \vartheta; \\ 0; & 0; & 0; & 1; \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где r_{g2} – расчетный радиус резцовой головки; λ – угол разворота плоскости, в которой задана режущая кромка; δ – смещение плоскости относительно y_p .

$$\lambda = \arcsin\left(\frac{\delta}{r_{g2}}\right). \quad (3)$$

Раскрывая (1), найдем:

$$\begin{aligned} x_p &= u \cos(\vartheta + \lambda) \sin \alpha - r_{g2} \cos \vartheta; \\ y_p &= u \cos \alpha; \\ z_p &= u \sin(\vartheta + \lambda) \sin \alpha - r_{g2} \sin \vartheta. \end{aligned} \quad (4)$$

При $\lambda=0$ поверхность (4) вырождается в поверхность прямого кругового конуса с углом $\alpha = \alpha_0$, α_0 – угол исходного производящего контура.

Определим текущий радиус поверхности вращения (4):

$$\begin{aligned} D &= \sqrt{x_p^2 + y_p^2} = \\ &= \sqrt{u^2 \sin^2 \alpha - 2ur_{g2} \sin \alpha \cos \lambda + r_{g2}^2}, \end{aligned} \quad (5)$$

который позволяет преобразовать выражения (4) к виду:

$$x_p = D \cos \vartheta; \quad y_p = u \sin \alpha; \quad z_p = D \sin \vartheta. \quad (6)$$

Для расчета проекций n_x, n_y, n_z нормали поверхности (4) используем зависимости [12, 15]:

$$\begin{aligned} n_x &= y_{pu} z_{p\vartheta} - y_{p\vartheta} z_{pu}; \\ n_y &= -x_{pu} z_{p\vartheta} + x_{p\vartheta} z_{pu}; \\ n_z &= x_{pu} y_{p\vartheta} - x_{p\vartheta} y_{pu}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $x_{pu}, y_{pu}, z_{pu}, x_{p\vartheta}, y_{p\vartheta}, z_{p\vartheta}$ – частные производные выражений (6) по параметрам u и ϑ .

$$\begin{aligned} x_{pu} &= \frac{\sin \alpha (u \sin \alpha - r_{g2} \cos \lambda) \cos \vartheta}{D}; \\ y_{pu} &= \cos \alpha; \\ z_{pu} &= \frac{\sin \alpha (u \sin \alpha - r_{g2} \cos \lambda) \sin \vartheta}{D}. \end{aligned} \quad (8)$$

$$x_{p\vartheta} = -D \sin \vartheta; \quad y_{p\vartheta} = 0; \quad z_{p\vartheta} = D \cos \vartheta. \quad (9)$$

Раскрывая (7) на основе (8), (9), установим:

$$\begin{aligned} n_x &= D \cos \alpha \cos \vartheta; \\ n_y &= -\sin \alpha (u \sin \alpha - r_{g2} \cos \lambda); \\ n_z &= D \cos \alpha \sin \vartheta. \end{aligned} \quad (10)$$

Определим модуль нормали:

$$\begin{aligned} N &= \sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2} = \\ &= \sqrt{(u \sin \alpha - r_{g2} \cos \lambda)^2 + (r_{g2} \cos \alpha \sin \lambda)^2}, \end{aligned} \quad (11)$$

учитывая который, по формулам (10) получим выражения для орта нормали поверхности (4):

$$\begin{aligned} m_x &= \frac{D \cos \alpha \cos \vartheta}{N}; \\ m_y &= \frac{-\sin \alpha (u \sin \alpha - r_{g2} \cos \lambda)}{N}; \\ m_z &= \frac{D \cos \alpha \sin \vartheta}{N}. \end{aligned} \quad (12)$$

Введем обозначения:

$$\begin{aligned} \cos \xi &= \frac{D \cos \alpha}{N}; \\ \sin \xi &= \frac{\sin \alpha (u \sin \alpha - r_{g2} \cos \lambda)}{N}. \end{aligned} \quad (13)$$

Эти выражения позволяют для орта нормали (12) получить зависимости:

$$\begin{aligned} m_x &= \cos \xi \cos \vartheta; \\ m_y &= -\sin \xi; \\ m_z &= \cos \xi \sin \vartheta. \end{aligned} \quad (14)$$

В выражениях (13) и (14) угол ξ является переменным углом профиля производящей поверхности резцовой головки (6). Знание этого угла позволяет в любой текущей точке M поверхности (6) иметь систему координат $S_M(x_M, y_M, z_M)$, две оси которой x_M и z_M определяют на поверхности (6) главные направления, а ось y_M направлена по нормали к поверхности (6) (рис. 3). Использование системы координат $S_M(x_M, y_M, z_M)$, позволяет существенно упростить расчет геометрических характеристик поверхностей арочных зубьев.

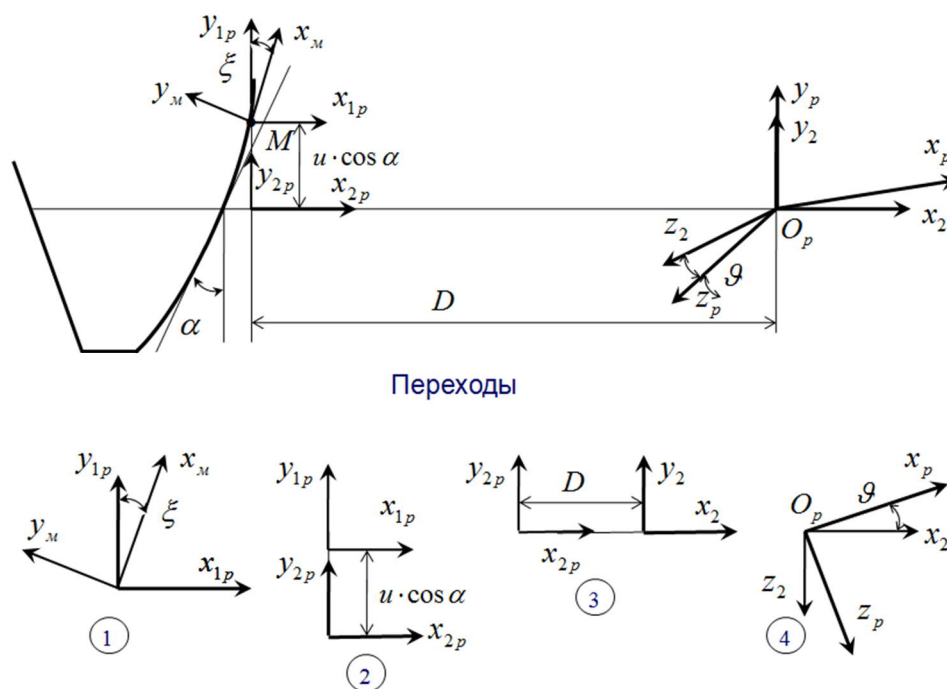


Рис. 3. Переходы от системы координат $S_M(x_M, y_M, z_M)$ к системе координат $S_p(x_p, y_p, z_p)$

Fig. 3. Transitions from the coordinate system $S_M(x_M, y_M, z_M)$ to the coordinate system $S_p(x_p, y_p, z_p)$

Вспользуемся **рис. 3**, на основе которого определим матрицу перехода $\tilde{A}_{M,p}$ от системы координат $S_p(x_p, y_p, z_p)$ к системе координат $S_M(x_M, y_M, z_M)$:

$$\tilde{A}_{M,p}(u, \vartheta) = \begin{pmatrix} \cos \vartheta \cdot \sin \xi; & \cos \xi; & \sin \vartheta \cdot \sin \xi; & D \cdot \sin \xi - u \cdot \cos \alpha \cdot \cos \xi; \\ -\cos \vartheta \cdot \cos \xi; & \sin \xi; & -\sin \vartheta \cdot \cos \xi; & -D \cdot \cos \xi - u \cdot \cos \alpha \cdot \sin \xi; \\ -\sin \vartheta; & 0; & \cos \vartheta; & 0; \\ 0; & 0; & 0; & 1; \end{pmatrix}. \quad (15)$$

Важнейшей характеристикой производящей поверхности инструмента являются ее главные кривизны k_1 и k_2 . Их определение является результатом решения следующих двух уравнений [12, 15]:

$$k_1 + k_2 = \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{\Delta} \quad \text{и} \quad k_1 \cdot k_2 = \frac{\Delta_3}{\Delta}, \quad (16)$$

где $\Delta, \Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ – определители второго порядка.

$$\Delta = \begin{vmatrix} x_{pu}^M & x_{p\vartheta}^M \\ z_{pu}^M & z_{p\vartheta}^M \end{vmatrix}; \quad \Delta_1 = \begin{vmatrix} x_{pu}^M & x_{p\vartheta}^M \\ m_{zu}^M & m_{z\vartheta}^M \end{vmatrix};$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} m_{xu}^M & m_{x\vartheta}^M \\ z_{pu}^M & z_{p\vartheta}^M \end{vmatrix}; \quad \Delta_3 = \begin{vmatrix} m_{xu}^M & m_{x\vartheta}^M \\ m_{zu}^M & m_{z\vartheta}^M \end{vmatrix},$$

элементы которых $x_{pu}^M, z_{pu}^M, x_{p\vartheta}^M, z_{p\vartheta}^M$ являются производными по параметрам u и ϑ от координат радиус-вектора (6) производящей по-

верхности, переписанные с помощью матрицы (15) из системы координат $S_p(x_p, y_p, z_p)$ в систему координат $S_M(x_M, y_M, z_M)$; $m_{xu}^M, m_{zu}^M, m_{x\vartheta}^M, m_{z\vartheta}^M$ – производные по параметрам u и ϑ от проекций орта нормали (14) производящей поверхности, переписанные с помощью матрицы (15) из системы координат $S_p(x_p, y_p, z_p)$ в систему координат $S_M(x_M, y_M, z_M)$.

Производные от проекций радиус-вектора (6) и проекций орта нормали (14) в системе координат $S_M(x_M, y_M, z_M)$ имеют вид:

$$\begin{aligned} x_{pu}^M &= -D_u \cdot \sin \xi + \cos \xi \cdot \cos \alpha; & z_{pu}^M &= 0; \\ x_{p\vartheta}^M &= 0; & z_{p\vartheta}^M &= -D; & m_{xu}^M &= -\frac{d\xi}{du}; \\ m_{zu}^M &= 0; & m_{x\vartheta}^M &= 0; & m_{z\vartheta}^M &= \cos \xi, \end{aligned} \quad (17)$$

где D_u – производная по u величины D (5), а $\frac{d\xi}{du}$ – производная по параметру u угла ξ (13):

$$D_u = \frac{\sin\alpha \cdot (u \cdot \sin\alpha - r_{g2} \cdot \cos\lambda)}{D},$$

$$\frac{d\xi}{du} = \frac{(r_{g2} \cdot \cos\alpha \cdot \sin\lambda \cdot \sin\alpha)^2}{N^3}. \quad (18)$$

На основе зависимостей (17), (18) определим выражения для определителей (16):

$$\Delta = (D_u \sin\xi - \cos\xi \cos\alpha) D;$$

$$\Delta_1 = -(D_u \sin\xi - \cos\xi \cos\alpha) \cos\xi;$$

$$\Delta_2 = D \frac{d\xi}{du};$$

$$\Delta_3 = -\cos\xi \frac{d\xi}{du}. \quad (19)$$

Подставляя полученные для Δ , Δ_1 , Δ_2 , Δ_3 зависимости (19) в два линейных уравнения (16)

$$k_1 + k_2 = -\frac{\cos\xi}{D} - \frac{\frac{d\xi}{du}}{(-D_u \cdot \sin\xi + \cos\xi \cdot \cos\alpha) \cdot D},$$

$$k_1 \cdot k_2 = -\frac{\cos\xi \cdot \frac{d\xi}{du}}{(-D_u \cdot \sin\xi + \cos\xi \cdot \cos\alpha) \cdot D}$$

и решая их относительно k_1 и k_2 , найдем:

$$k_1 = -\frac{\cos\xi}{D} = -\frac{\cos\alpha}{N};$$

$$k_2 = -\frac{\frac{d\xi}{du}}{(-D_u \cdot \sin\xi + \cos\xi \cdot \cos\alpha) \cdot D} = \frac{D}{N} \cdot \frac{d\xi}{du}. \quad (20)$$

При $\lambda=0$ и $\alpha = \alpha_0$ зависимости (20) соответствуют главным кривизнам прямого кругового конуса:

$$k_1 = -\frac{\cos\alpha_0}{u \cdot \sin\alpha_0 - r_{g2}} \quad \text{и} \quad k_2 = 0.$$

В расчетной точке производящей поверхности (6) резцовой головки $u=0$. В расчетной точке поверхности арочного зуба величина угла ξ должна соответствовать углу профиля ис-

ходного производящего контура α_0 . Для того чтобы в расчетной точке касательная к поверхности (6) в плоскости, проходящей через ось вращения головки, составляла с этой осью угол α_0 , необходимо угол профиля резцов α зуборезной головки скорректировать. Используя выражения для $\sin\xi$ (13) при $u=0$, запишем

$$\sin\xi = \frac{\sin\alpha \cdot \cos\lambda}{\sqrt{\cos^2\lambda + \cos^2\alpha \cdot \sin^2\lambda}} = \sin\alpha_0. \quad (21)$$

Решая это уравнение относительно угла α – наклона режущей кромки относительно оси вращения резцовой головки y_p , найдем

$$\sin\alpha = \frac{\sin\alpha_0}{\sqrt{\cos^2\lambda + \sin^2\lambda \cdot \sin^2\alpha_0}}. \quad (22)$$

Полученные формулы при $\alpha_0 > 0$ соответствуют производящей поверхности круговой резцовой головки, используемой для обработки выпуклой стороны арочного зуба колеса, а при $\alpha_0 < 0$ – вогнутой поверхности арочного зуба. Резцовая головка с производящей поверхностью в виде (6) при $\lambda \neq 0$ и $\alpha_0 < 0$ позволяет вогнутую поверхность арочного зуба колеса выполнить с модификацией профиля.

При фиксированном значении $u = \text{const}$, учитывая (5) и (22), величина отклонения Δ_u поверхности (6) от образующей прямого кругового конуса при заданных r_{g2} , λ и α_0 рассчитывается по выражению

$$\Delta_u = (u \operatorname{tg}\alpha_0 - r_{g2}) - \sqrt{u^2 \operatorname{tg}^2\alpha - 2ur_{g2} \operatorname{tg}\alpha \cos\lambda + r_{g2}^2}. \quad (23)$$

На **рис. 4** для производящей поверхности (6) резцовой головки, имеющей $r_{g2} = 100$ мм, $\alpha_0 = 0,34907$, $\lambda = 0,31416(\triangle); 0,2618(\circ); 0,17453(\square)$ (соответственно $\alpha = 0,36551; 0,36036; 0,35401$) в пределах $-5 \text{ мм} \leq u \leq 5 \text{ мм}$, показаны отклонения Δ_u от образующей прямого кругового конуса, а на **рис. 5** в пределах этой образующей рассчитанные значения кривизны по профилю k_2 поверхности (6).

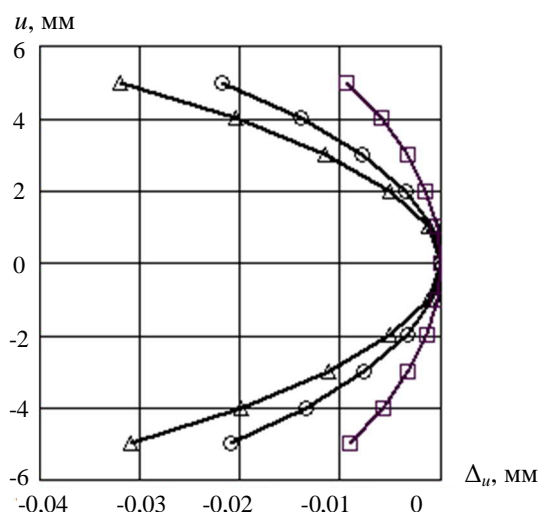


Рис. 4. Отклонение Δu по высоте образующей
Fig. 4. Deviation Δu in height of the generatrix

Полученные результаты и их обсуждение

Резцовые головки с наружными резцами, проекции радиус-вектора и орта нормали производящей поверхности которых получены в статье, в процессе формообразования вогнутых сторон арочных зубьев цилиндрических колес обкатных передач позволяют осуществить требуемую модификацию профиля, исключая удар при входе зубьев в зацепление. Для арочных зубьев колес полуобкатных передач, нарезание которых выполняется методом копирования, выражения радиус-вектора и орта нормали производящей поверхности резцовой головки, переписанные в систему координат, жестко связанной с колесом, описывают поверхность арочного зуба с профильной модификацией.

Список источников

1. Сызранцев В.Н., Сызранцева К.В. Цилиндрические передачи с арочными зубьями: геометрия, прочность, надежность: монография. Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2021. 170 с.
2. Syzrantsev V.N. Cylindrical Arc Gears: History, Achievements, and Problem // Mechanisms and Machine Science. 2021, vol. 101, pp. 131-151. doi.org/10.1007/978-3-030-73022-2_6
3. Arafa Hani A., Bedewy M. Manufacturability and viability of different C-Gear types: A comparative study. Proceedings of the ASME 2012 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2012. August 12-15, 2012, Chicago, IL, USA. DETC2012-71030.
4. Arafa H.A. C-gears: Geometry and Machining, Part C // Journal of Mechanical Engineering Science. 2005, vol. 219, no. 7, pp. 709-726.

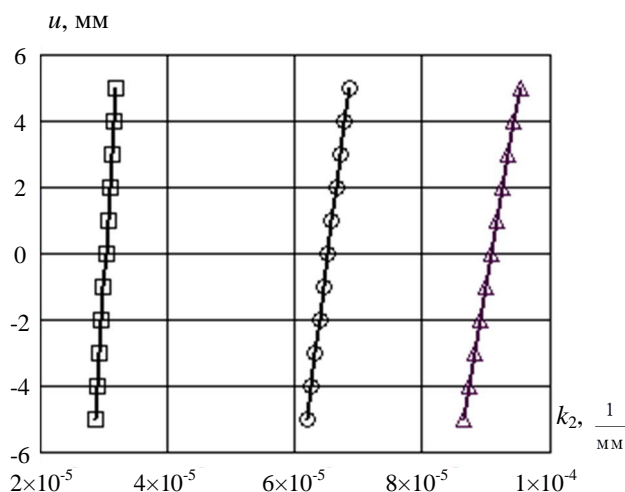


Рис. 5. Изменение k_2 по высоте образующей
Fig. 5. Change k_2 in height of the generatrix

5. Jiang Y. Contact ratio calculation of involute arc gear device Academic // Journal of Manufacturing Engineering. 2017, vol. 15, no. 3, pp. 19-22.
6. Jiang Y-Q., Hou L., Zhao Y. The Equation of the Contact Line of the Involute Curvilinear-Tooth Cylindrical Gear Pump for the Agricultural Tractor // The Open Mechanical Engineering Journal. 2014, vol. 8, pp. 879-884.
7. Chang Q., Hou L. Parallel translating mechanism process-oriented mathematical model and 3-D model for cylindrical gears with curvilinear shaped teeth // Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering. 2016. vol. 10, no. 3, pp. 171-177.
8. Jiang Y., Hou L., Sun Z., Xiao H. Meshing features of involute arc teeth cylindrical gears // Journal of Chemical and Pharmaceutical Research. 2014, vol. 6, no. 7, pp. 2387-2393.
9. Ma Z., Deng C. Machining Method of Whole Modified Surface of Cylindrical Gears with Arcuate Tooth Trace [J] // Journal of Mechanical engineering. 2012, vol. 48, no. 5, pp. 165-171. doi.org/10.3901/jme.2012.05.165.
10. Zhang Q., Hou L., Tang R., and Wen G. Method of processing and an analysis of meshing and contact of circular arc tooth trace cylindrical gears // Transactions of FAMENA, 2016, vol. 40, no. 4, pp. 11-24.
11. Song A., Wu W., and Gao S. The ideal geometry parameters of arch cylindrical gear and its process method // Journal of Shanghai Jiaotong University. 2010, vol. 44, no. 12, pp. 1735-1740.
12. Syzrantsev V.N., Syzrantseva K.V. Study of geometric characteristics of the arc teeth semi-rolled cylindrical gear meshing // FME Transactions. 2021. T. 49. № 2. С. 367-373.
13. Бочкова Д.Е., Бобков М.Н., Золотова С.А. Обработка круговых зубьев пары цилиндрических колес с локализованной зоной касания // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. №5. С. 344-349.

14. Babichev D.T., Lagutin S.A., Barmina N.A. Russian School of the Theory and Geometry of Gearing. Part 2. Development of the Classical Theory of Gearing and Establishment of the Theory of Real Gearing in 1976-2000 // Mechanisms and Machine Science (Book Series). 2019, vol. 81, pp. 1-46.
15. Syzrantseva K.V., Syzrantsev V.N., Kolbasin D.S. Forming Surfaces of a Semi-rolled Cylindrical Gearing Wheel and a Gear Arc Teeth. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2021, pp. 134-141. doi.org/10.1007/978-3-030-54814-8_16
16. Wu Y., Hou Li, Ma D., Wei Y., Luo L. Milling Machine Error Modelling and Analysis in the Machining of Circular-Arc-Tooth-Trace Cylindrical Gears // Transactions of FAMENA. 2021, vol. 44, no. 4, pp. 13-29. doi.org/10.21278/TOF.444009419
7. Chang Q., Hou L. Parallel translating mechanism process-oriented mathematical model and 3-D model for cylindrical gears with curvilinear shaped teeth. Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering. 2016;10(3):171-177.
8. Jiang Y., Hou L., Sun Z., Xiao H. Meshing features of involute arc teeth cylindrical gears. Journal of Chemical and Pharmaceutical Research. 2014;6(7):2387-2393.
9. Ma Z., Deng C. CNC machining method of whole modified surface of cylindrical gears with arcuate tooth trace. Journal of Mechanical Engineering. 2012;48(5):165-171. DOI: 10.3901/jme.2012.05.165
10. Zhang Q., Hou L., Tang R., Wen G. Method of processing and an analysis of meshing and contact of circular arc tooth trace cylindrical gears. Transactions of FAMENA. 2016;40(4):11-24.
11. Song A., Wu W., Gao S. The ideal geometry parameters of arch cylindrical gear and its process method. Journal of Shanghai Jiaotong University. 2010;44(12):1735-1740.
12. Syzrantsev V.N., Syzrantseva K.V. Study of geometric characteristics of the arc teeth semi-rolled cylindrical gear meshing. FME Transactions. 2021;49(2):367-373.
13. Bochkova D.E., Bobkov M.N., Zolotova S.A. Machining circular teeth of a pair of cylindrical gears with a localized contact zone. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Engineering Sciences]. 2020;(5):344-349. (In Russ.)
14. Babichev D.T., Lagutin S.A., Barmina N.A. Russian School of the Theory and Geometry of Gearing. Part 2. Development of the classical theory of gearing and establishment of the theory of real gearing in 1976-2000. Mechanisms and Machine Science (Book Series). 2019;81:1-46.
15. Syzrantseva K.V., Syzrantsev V.N., Kolbasin D.S. Forming surfaces of a semi-rolled cylindrical gearing wheel and a gear arc teeth. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2021;134-141. DOI: 10.1007/978-3-030-54814-8_16
16. Wu Y., Hou Li, Ma D., Wei Y., Luo L. Milling machine error modelling and analysis in the machining of circular-arc-tooth-trace cylindrical gears. Transactions of FAMENA. 2021;44(4):13-29. DOI: 10.21278/TOF.444009419

References

1. Syzrantsev V.N., Syzrantseva K.V. *Tsilindricheskie peredachi s arochnymi zubyami: geometriya, prochnost, nadezhnost: monografiya* [Cylindrical gears with arch teeth: geometry, strength, reliability: monograph]. Tyumen: Tyumen Industrial University; 2021. 170 p. (In Russ.)
2. Syzrantsev V.N. Cylindrical arc gears: History, achievements, and problem. Mechanisms and Machine Science. 2021;101:131-151. DOI: 10.1007/978-3-030-73022-2_6
3. Arafa Hani A., Bedewy M. Manufacturability and viability of different C-Gear types: A comparative study. Proceedings of the ASME 2012 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2012. August 12-15, 2012, Chicago, IL, USA. DETC2012-71030.
4. Arafa H.A. C-gears: Geometry and machining, Part C. Journal of Mechanical Engineering Science. 2005;219(7):709-726.
5. Jiang Y. Contact ratio calculation of involute arc gear device. Academic Journal of Manufacturing Engineering. 2017;15(3):19-22.
6. Jiang Y.-Q., Hou L., Zhao Y. The equation of the contact line of the involute curvilinear-tooth cylindrical gear pump for the agricultural tractor. The Open Mechanical Engineering Journal. 2014;8:879-884.

Поступила 21.12.2022; принята к публикации 17.01.2023; опубликована 27.03.2023
Submitted 21/12/2022; revised 17/01/2023; published 27/03/2023

Сызранцев Владимир Николаевич – доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, заведующий кафедрой машин и оборудования нефтяной и газовой промышленности, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия.
Email: syzrantsevn@tyuiu.ru. ORCID 0000-0002-1422-4799

Стариков Александр Иванович – аспирант кафедры технологии машиностроения, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия.
Email: starikovai@tyuiu.ru. ORCID 0000-0003-2988-5765

Vladimir N. Syzrantsev – DrSc (Eng.), Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Head of the Department of Machines and Equipment for the Oil and Gas Industry, Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia.
Email: syzrantsevv@tyuiu.ru. ORCID 0000-0002-1422-4799

Aleksandr I. Starikov – postgraduate student of the Department of Engineering Technologies, Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia.
Email: starikovai@tyuiu.ru. ORCID 0000-0003-2988-5765

СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

STANDARDIZATION, CERTIFICATION AND QUALITY MANAGEMENT

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

УДК 658.5.011

DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-1-65-73



ПРОБЛЕМЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ В УСЛОВИЯХ НОВОЙ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

Дранкова Н.А., Денисова Я.В.

Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия

Аннотация. Сложные экономические условия, в которых оказалась наша страна в настоящий период, характеризуются структурной трансформацией экономики, изменяющимися внутренними и внешними условиями развития, что, в свою очередь, предполагает продолжение курса к созданию технологического суверенитета товаров и услуг, стратегическое изменение финансово-экономической политики, стимулирование развития всех отраслей народного хозяйства. Чтобы осуществить данную структурную перестройку, требуется «запустить» целый ряд механизмов, способствующих ускорению процессов преобразования. Одним из таких механизмов, по мнению авторов, является четкое и эффективное функционирование системы менеджмента качества, способное обеспечить слаженность всех элементов производственной системы. Авторами настоящей статьи предложен подход по внедрению и эффективному функционированию системы менеджмента качества (СМК) в условиях новой экономической реальности. В исследовании использованы данные, полученные при проведении аудитов в организациях-поставщиках, осуществляющих свою деятельность в машиностроительной отрасли, а также в компании-производителе контрольно-измерительных приборов ЗАО «Электронные и механические измерительные системы» (г. Челябинск). Результаты настоящего исследования позволили решить следующие задачи: выявлены требования, предъявляемые к предприятиям и их продукции в новых экономических условиях; проанализированы причины низкой эффективности и результативности СМК, присущие большинству организаций; определены факторы, влияющие на результативное внедрение и эффективное функционирование СМК в условиях новой экономической среды. Ключевым результатом работы является предложенный авторский подход по внедрению СМК, способный обеспечить организациям достижение своих стратегических целей в условиях трансформации экономики. Отмечается важность учета личностного фактора руководителей и собственников бизнеса при управлении СМК, а также необходимость формирования тесной взаимосвязи СМК с производственным менеджментом.

Ключевые слова: система менеджмента качества, эффективность СМК, новая экономическая среда, качество, анализ СМК

© Дранкова Н.А., Денисова Я.В., 2023

Для цитирования

Дранкова Н.А., Денисова Я.В. Проблемы эффективности системы менеджмента качества и пути их решения в условиях новой экономической среды // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №1. С. 65-73. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-65-73>



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

PROBLEMS OF EFFICIENCY OF THE QUALITY MANAGEMENT SYSTEM AND WAYS TO SOLVE THEM IN THE NEW ECONOMIC ENVIRONMENT

Drankova N.A., Denisova Ya.V.

Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

Abstract. The difficult economic conditions faced by this country now are characterized by a structural transformation of the economy, changing internal and external development conditions, which, in turn, imply continuing the creation of technological sovereignty of goods and services, strategic change of financial and economic policy, stimulation of development of all the sectors of the national economy. To implement this restructuring, it is necessary to “launch” a number of mechanisms that contribute to accelerating the transformation processes. One of such mechanisms, according to the authors, is clear and efficient functioning of the quality management system, ensuring the coherence of all the elements of the production system. The authors of this article propose an approach to the introduction and efficient functioning of QMS in the new economic reality. The study uses data obtained during audits of suppliers carrying out their activities in the engineering industry, as well as a manufacturer of control and measuring devices, CJSC Electronic and Mechanical Measuring Systems (in Chelyabinsk). The results of this study have led to the following: the authors have identified the requirements for enterprises and their products in the new economic conditions, analyzed the reasons for low efficiency and effectiveness of QMS common for most organizations, and identified factors influencing the effective implementation and efficient functioning of QMS in the new economic environment. The key result of the study is the proposed author’s approach to implementing QMS, providing organizations with the achievement of their strategic goals in the economic transformation condition. The authors note that it is important to factor into the personal factor of directors and owners in the management of QMS, and it is required to form a close relationship between QMS and production management.

Keywords: quality management system, QMS efficiency, new economic environment, quality, QMS analysis

For citation

Drankova N.A., Denisova Ya.V. Problems of Efficiency of the Qualitymanagement System and Ways to Solve Them in the New Economic Environment. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 1, pp. 65-73. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-65-73>

Введение

Сложившаяся в нашей стране политико-экономическая ситуация, сопровождающаяся беспрецедентными санкциями и жесточайшим давлением на экономику, дала толчок развитию многих отечественных отраслей и обусловила переход к созданию технологического суверенитета. Трансформация экономической среды подразумевает изменение принципов, методов и средств организационно-экономического управления, реорганизацию производственных процессов, условий экономического взаимодействия и перераспределение ресурсов. Всё это нацелено на формирование новой экономической среды, независимой от зарубежных контрагентов и способной обеспечить поступательное устойчивое развитие.

Новые экономические условия требуют перестройки многих производственных и хозяйственных процессов, корректировки процессов

обмена и распределения, решения вопросов технологического характера, изменения взаимоотношений на производстве. Это сопряжено с решением следующих задач:

- повышение производительности труда. Россия сегодня по данному показателю отстает от многих промышленно-развитых стран, и без снижения затрат, оптимизации процессов, улучшения технологий и использования оборудования, отвечающего насущным потребностям, ситуация может значительно ухудшиться;
- внедрение инновационных проектов, которые дадут импульс экономическому развитию и окажут существенную поддержку формированию инженерно-технологических научных школ;
- усиление роли научно-технологического менеджмента, без которого невозможно создание новых эффективных и высокотехнологичных производств. В России данное направление находится на достаточно низком уровне и, как

следствие этого, инвестиционная и инновационная активность в реальном секторе экономики оставляет желать лучшего по причине незначительного количества специалистов, способных оценить коммерческий потенциал производственно-технологических проектов и эффективно его использовать [1];

- прогнозирование долгосрочного спроса на продукцию и услуги. Оно является необходимым при планировании, разработках и коммерциализации новой продукции, а также для решения стратегических и тактических целей организации;

- цифровизация производства. В современных условиях цифровизация является одним из главных факторов для создания высокотехнологичного бизнеса, улучшения качества продукции и повышения её конкурентоспособности, базой для внедрения инновационной СМК [2];

- увеличение электронной коммерции, с помощью которой можно обеспечить сокращение издержек и повысить прозрачность цен.

Выполнение вышеперечисленных задач будет также способствовать решению главного требования, предъявляемого к продукции, создаваемой новой экономической средой, – недопущение ухудшения качества вследствие нарушенных экономических связей и разработка путей его улучшения. В соответствии с этим СМК должна соответствовать условиям новой экономической среды и обеспечивать стабильность работы системы при возможной недостаточности ресурсов: финансовых, материальных, информационных, человеческих.

В настоящее время качество воспринимается не только как набор определенных свойств по умолчанию, но и как совокупность требований, полностью отражающих ожидания потребителей [3]. Результатом этого является высокий спрос на адресные, целевые продукты, предназначенные для определенных групп потенциальных потребителей и соответствующие их определенным потребностям и предпочтениям. Руководители многих организаций считают, что за последние годы интерес к адресным, целевым продуктам у потребителей значительно вырос [3]. Возможно, данный интерес связан с развитием технологического сектора в сфере потребления (бытовая техника, гаджеты, «умные дома» и т.д.) и тем, что потребитель стал более «узко сегментированным» и технически грамотным при выборе продукции/услуги. Поэтому для выпуска адресных, целевых продуктов организациям необходимо более тщательно изучать своего по-

ребителя и его предпочтения. Кроме того, для обеспечения высокого качества важно выстраивать систему менеджмента качества на предприятии таким образом, чтобы она была достаточно гибкой и позволяла достигать желаемых коммерческих показателей. Но, к сожалению, многие предприятия, «внедряя стандарт ISO 9001:2015 (ГОСТ Р ИСО 9001-2015) «Системы менеджмента качества. Требования», так и не получают намеченных результатов» вследствие допускаемых ими стандартных ошибок [4].

Вопрос о том, что же следует сделать во избежание таких ошибок, является актуальным, так как на момент написания данной статьи в поисковой системе Google по указанной теме насчитывается около 24 800 запросов. Авторы анализируют и предлагают своё видение ошибок, но все они так или иначе сводятся к следующему перечню причин:

- Отстраненность высшего руководства.

- Формальное отношение к разработке и внедрению системы (с целью получения сертификата соответствия в максимально короткие сроки) [4].

- Неполная реализация процессного подхода.

- Различное понимание требований и, как следствие этого, содержание не в полном объеме требований во внутренней документации либо содержание излишне детализированных требований, которые проявляются в большом количестве отчетных, дублирующих форм, перегруженных бланков и т.д. [5-7].

- Недостаточное применение математико-статистических методов анализа процессов [8].

Чтобы разобраться в поднятой проблеме, необходимо обратить внимание на тот факт, что в настоящее время не существует единой универсальной методики расчета эффективности систем качества, которая была бы подходящей для любого предприятия и вида деятельности. Авторы, занимающиеся исследованием эффективности систем качества, в качестве причин низкой эффективности и результативности СМК, как правило, называют то, что необходимо для подтверждения выдвигаемой ими гипотезы, и игнорируют все прочие факторы. Поэтому зачастую методы, применяемые для внедрения и эффективного функционирования СМК в одной организации, не дают результата при внедрении в другой.

Помимо вышеизложенного, также важно помнить, что создание реально действующей СМК – индивидуальный процесс для каждой организации, при котором необходимо не про-

сто выделять основные факторы, которые будут однозначно влиять на эффективность системы, но также анализировать причинно-следственные связи второго, третьего уровня и т.д., таким образом разбирая процесс до мельчайших деталей. Но даже это не будет гарантировать 100%-ю предсказуемость системы, так как сложные системы сложно предсказуемы, а на микроуровне многие события являются случайными. Кроме того, в каждом событии, которое анализируется, существуют факторы, на которые возможно повлиять, и факторы, которые находятся вне зоны влияния. Соответственно, чем больше возможных альтернатив, тем большее количество факторов требуется оценить и проанализировать [9].

Полученные результаты и их обсуждение

В данной статье при рассмотрении вопроса эффективности СМК авторами было решено отступить от рассмотрения причин, связанных с соблюдением в организациях в полном объеме требований регламентирующего документа ISO 9001:2015 (ГОСТ Р ИСО 9001-2015), а обратить внимание на личностный подход к управлению и отношению к СМК исполнительными директорами и собственниками бизнеса.

При разработке данного подхода авторами были использованы данные, полученные в течение 4-летнего периода в ЗАО «Электронные и механические измерительные системы» (далее ЗАО «ЭМИС»).

В указанной организации на протяжении обозначенного периода времени ежегодно проводились аудиты поставщиков с целью подтверждения их способности обеспечить выполнение установленных требований заказчиков, внутренних и внешних требований (в том числе ГОСТ Р ИСО/МЭК 80079-34-2013), а также поставлять продукцию, отвечающую своему назначению. Аудиты проводились с частотой не реже одного раза в год, но при увеличении количества несоответствующей продукции, выявляемой на входном контроле, проводились также внеплановые аудиты.

Географическое распределение организаций-поставщиков по числу предприятий (рис. 1), в которых проводились аудиты, представлено следующим образом: Санкт-Петербург – 40%, Челябинск – 20%, Челябинская область – 20%, Москва – 10%, Ростов-на-Дону – 10%.

На основании проведенного исследования были получены данные, которые противоречат утверждениям некоторых авторов [10] о том, что в регионах недооценивается значение СМК и ее влияние на показатели производственно-хозяйственной деятельности и, соответственно, там требуется всестороннее развитие менеджмента качества и применение «новаторского подхода». Как показал анализ поставщиков, проведенный в ЗАО «ЭМИС», географическое расположение и размер населенного пункта не оказывают значимого влияния на понимание руководителями важной роли СМК для их организации.

В то же время необходимо указать, что аудит проводился в основном в организациях (90% от общего числа), поставляющих продукцию, к которой существуют высокие требования по показателям надежности, безопасности и взрывозащищенности, согласно внешней нормативной документации и требованиям заказчиков. К продукции оставшейся части поставщиков (10% от общего числа) такие требования отсутствуют в силу характера поставляемой ими продукции. В ходе аудитов была выявлена закономерность, заключающаяся в том, что чем больше требований предъявляется к продукции в части надежности, безопасности и обеспечении взрывозащищенности, тем более ответственно и осознанно относятся руководители организаций к внедрению СМК.

На рис. 2 представлена оценка руководителями организаций-поставщиков степени важности внедрения СМК. Как видно из графика, 90% поставщиков комплектующих, к которым предъявлялись существенные требования по показателям качества, убеждены в том, что наличие СМК – скорее важно и очень важно. И только 10% поставщиков, к продукции которых предъявлялись несущественные требования, отмечают, что для них наличие СМК скорее неважно и больше является возможностью выхода на новые рынки и/или требованием крупного заказчика (клиента).

Кроме того, оказалось, что важность и значение СМК осознают те руководители, которые начали заниматься предпринимательской деятельностью еще в 90-е годы XX века. В тот непростой для страны период становления рыночной экономики сформировался целый пласт жестких и волевых руководителей, в результате чего именно такие топ-менеджеры с высокой нацеленностью на результат стали возглавлять многие успешные российские компании.

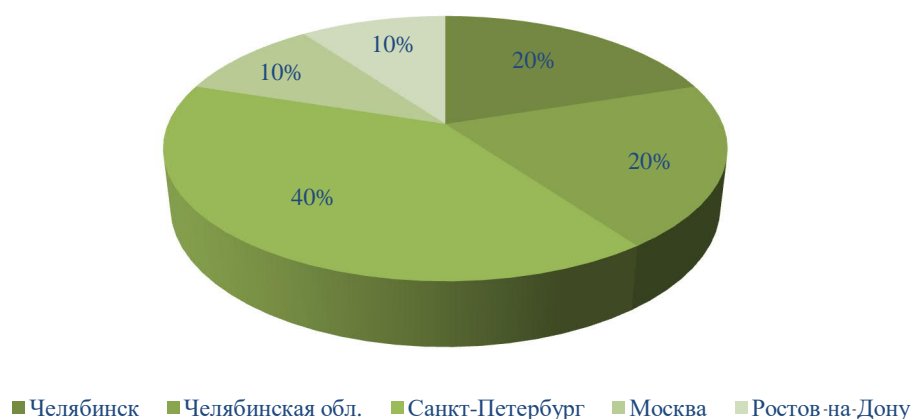


Рис. 1. Географическое распределение организаций-поставщиков, в которых проводился аудит, %
Fig. 1. Geographical distribution of audited suppliers, %

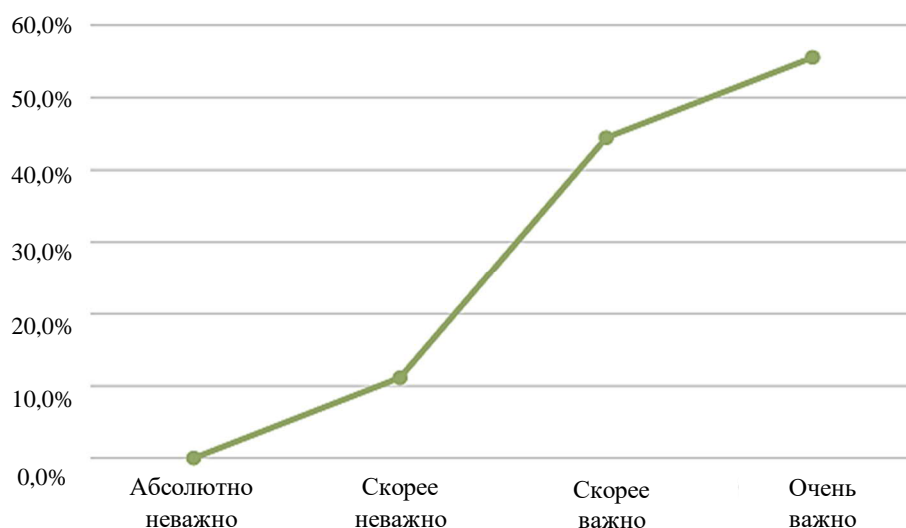


Рис. 2. Оценка степени важности внедрения СМК руководителями организаций, %
Fig. 2. Assessment of importance of QMS implementation by heads of organizations, %

Также при помощи дополнительных уточняющих вопросов удалось выяснить, к какому типу руководителей по спиральной динамике Клера Грейвза относится большинство из опрошенных руководителей. В соответствии с данной моделью любая живая система (человек, общество, организация или страна) проходит примерно одни и те же уровни развития и, зная их, можно понять цели и приоритеты живой системы [11]. Другими словами, данная теория способствует пониманию целей, жизненных ценностей и приоритетов каждого человека. К. Грейвз выделил 9 уровней социокультурного развития человека, каждому из которых присвоил определенный цвет. Оказалось, что большинство из опрошенных руководителей, в соответствии с данной моделью, относятся к уровню «красный», и им соответствуют такие

черты, как здоровая агрессия, бунт, что способствует наращиванию эго и уверенности в себе. Следовательно, руководители с мышлением «красного» уровня заинтересованы больше в достижении краткосрочных целей, но на долгосрочные цели они, как правило, не ориентированы.

Поэтому они считают, что внедрение СМК призвано решить следующие задачи:

- удовлетворение требований заказчиков при заключении контрактов (договоров);
- стремление повысить конкурентоспособность продукции;
- необходимость соответствовать условиям участия в тендерах, конкурсах и подобных мероприятиях, которые могут закончиться контрактом и служат рекламой организации;

– условие получения государственного заказа, льготного кредитования или страхования [6].

Дополнительным подтверждением сделанных выводов стали сведения, полученные из отчетной документации «Анализ со стороны руководства». У поставщиков с внедренной СМК отчет содержал входные данные, перечисленные в п. 9.3.2 ГОСТ Р ИСО 9001-2015, среди которых:

- статус действий по результатам предыдущих анализов со стороны руководства;
- изменения во внешних и внутренних факторах, касающихся системы менеджмента качества;
- информация о результатах деятельности и результативности системы менеджмента качества.

А также выходные данные (п. 9.3.3 ГОСТ Р ИСО 9001-2015):

- возможности для улучшения;
- изменения в системе менеджмента качества;
- потребности в ресурсах.

Однако, несмотря на широкий круг представленных критериев, руководители указывали, что для них при внедрении СМК в основном являются важными только два аспекта – это показатели удовлетворенности потребителей и количество несоответствий, выявленных на внешних и внутренних аудитах. На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что истинная цель внедрения СМК во многих организациях, к большому сожалению, не является совершенствованием управления организацией в целях повышения качества продукции и услуг, а внедрение СМК в результате осознанного и всесторонне продуманного решения встречается редко.

Что же нужно делать для того, чтобы организация при внедрении СМК достигала желаемых результатов?

Во-первых, на наш взгляд, одним из ключевых факторов является осознанное принятие решения о необходимости внедрения СМК именно владельцем бизнеса, а не исполнительным директором, которому передано руководство. Лицо, которое осуществляет руководство текущей деятельностью, заинтересовано в достижении прежде всего определенных финансово-экономических показателей, которые и являются основными критериями оценки его эффективности как менеджера. Такие важные результаты от внедрения СМК, как эффективное управление ресурсами, рисками, промышлен-

ленной и экологической безопасностью, персоналом, являются отсроченными по времени, но в конечном итоге оказывают системный, а также синергетический эффект, и увеличивают конкурентоспособность как продукции, так и самого предприятия.

Соответственно, если результат от внедрения СМК не виден сразу, то со стороны исполнительного директора может наблюдаться снижение заинтересованности в данном вопросе. Поэтому для него внедрение СМК может представлять интерес исключительно с точки зрения наличия сертификата, также способствующего увеличению сбыта продукции. Важно помнить, что первые результаты от внедрения любой системы управления можно ощутить только через 6-15 месяцев [12], а от внедрения СМК, как правило, через три года. Потеря интереса со стороны руководства может наблюдаться также и после получения сертификата соответствия на СМК, так как создается ощущение, что цель достигнута. В то же время получение сертификата не является гарантом того, что система выстроена и больше не нуждается в управлении, поэтому необходимо проводить постоянный мониторинг и корректировать процессы по мере необходимости.

Во-вторых, на что следует обратить внимание, на наш взгляд, это то, что владелец бизнеса, основываясь на истинных мотивах внедрения СМК, должен заранее определить результаты, которые он планирует получить от ее функционирования. Также необходимо довести ожидаемые результаты от внедрения СМК до сотрудников и специалистов, которые будут непосредственно заниматься разработкой СМК.

В-третьих, немаловажным фактором для эффективного функционирования СМК, на наш взгляд, является также принадлежность руководителей организаций к «желтым» или «зеленым» уровням согласно спиральной динамике Клера Грейвза, то есть к тем людям, которым присуща гибкость мышления, ощущение миссии, наличие внутренней мотивации, возможность мыслить в глобальных масштабах. Это необходимо для того, чтобы помочь выйти организациям на новый уровень развития и сформировать стратегию нового образца.

В-четвертых, руководителям организаций необходимо более глубоко анализировать СМК в соответствии с критериями, обозначенными в

разделе 9 «Оценка результатов деятельности» ГОСТ Р ИСО 9001-2015.

По нашему мнению, не следует уделять повышенное внимание показателям, отражающим удовлетворенность потребителей, так как зачастую анкеты, заранее заготовленные в организации, не затрагивают вопросы, которые действительно важны для потребителя. Следовательно, подобные анкеты не дают объективного представления об ожиданиях и требованиях потребителей. Чаще всего при анализе таких данных можно почерпнуть сведения лишь об оценке качества отдельных составляющих работы организации. Кроме того, иногда анкеты для заполнения попадают в руки узкопрофильных и недостаточно компетентных сотрудников, что также не способствует установлению итоговой объективной оценки.

Следующим фактором, значение которого не стоит сильно преувеличивать, является количество несоответствий, выявленных на внешних и внутренних аудитах. Действительно, с одной стороны, данный показатель является немаловажным и заслуживающим внимания. Но необходимо понимать, что при анализе данного аспекта особую важность представляет не количество выявленных несоответствий, а те последствия, к которым оно может привести. Поэтому в данном случае необходимо учитывать, к какому роду деятельности организации относится выявленное несоответствие. Например, такие несоответствия, относящиеся к управлению документацией, как число допущенных ошибок, имеют значительно менее серьезные последствия, чем те, которые выявляются на этапах производственного процесса или непосредственно у потребителя.

Действительно серьезное внимание должно быть уделено следующим факторам:

- причины невыполнения запланированных мероприятий, а также мероприятий, которые «переходят» из отчета в отчет, но не выполняются;
- причины недостижения целей в области качества;
- количество повторных несоответствий и принадлежность несоответствия к требованиям стандарта ISO 9001:2015 (ГОСТ Р ИСО 9001-2015);
- результаты аудита внешних поставщиков;
- достаточность ресурсов.

Кроме того, при внедрении СМК необходимо сделать особый акцент на эффективную ра-

боту производственного менеджмента, направленную на усовершенствование деятельности производственных систем. За счет тесной взаимосвязи СМК и производственного менеджмента система управления будет обладать следующими признаками:

- 1) целостность;
- 2) гибкость;
- 3) открытость;
- 4) целенаправленность;
- 5) результативность.

В свою очередь, наличие совокупности указанных признаков позволит системе управлять любыми производственными процессами более эффективно и рационально, что приобретает особую значимость в период трансформации отечественной экономики в условиях новой экономической среды. В соответствии с концепцией TQM, лежащей в основе современной теории Управления качеством, производители должны постоянно совершенствовать как качество производимой ими продукции, так и качество всех процессов. Принимая во внимание сложившийся во многих отраслях экономики дефицит финансовых, информационных, материальных ресурсов, кадров, часто становится проблематичным выпускать продукцию «точно в срок» в соответствии со всеми требованиями заказчика. Гибкость системы и возможность быстрой адаптации к изменяющимся условиям позволит предприятиям не только «выжить», но и нарастить свой производственный и финансовый потенциал.

Указанный подход по внедрению СМК в виде большинства предложенных рекомендаций был реализован в ЗАО «Электронные и механические измерительные системы» и подтвердил свою эффективность. Благодаря грамотным действиям и координации различных служб предприятия выстроенная СМК стала обладать вышеперечисленными признаками системы управления. Несмотря на сложную ситуацию, предприятие за 4 года с момента внедрения СМК смогло увеличить объем выпускаемой продукции более чем на 60%. Соответственно, существенно выросла и выручка от реализации, в том числе за счет своевременного добавления в матрицу выпускаемой продукции высоко маржинальной, производственно-ёмкой и сложной продукции (**рис. 3**), что позволило предприятию занять лидирующее место в отрасли.

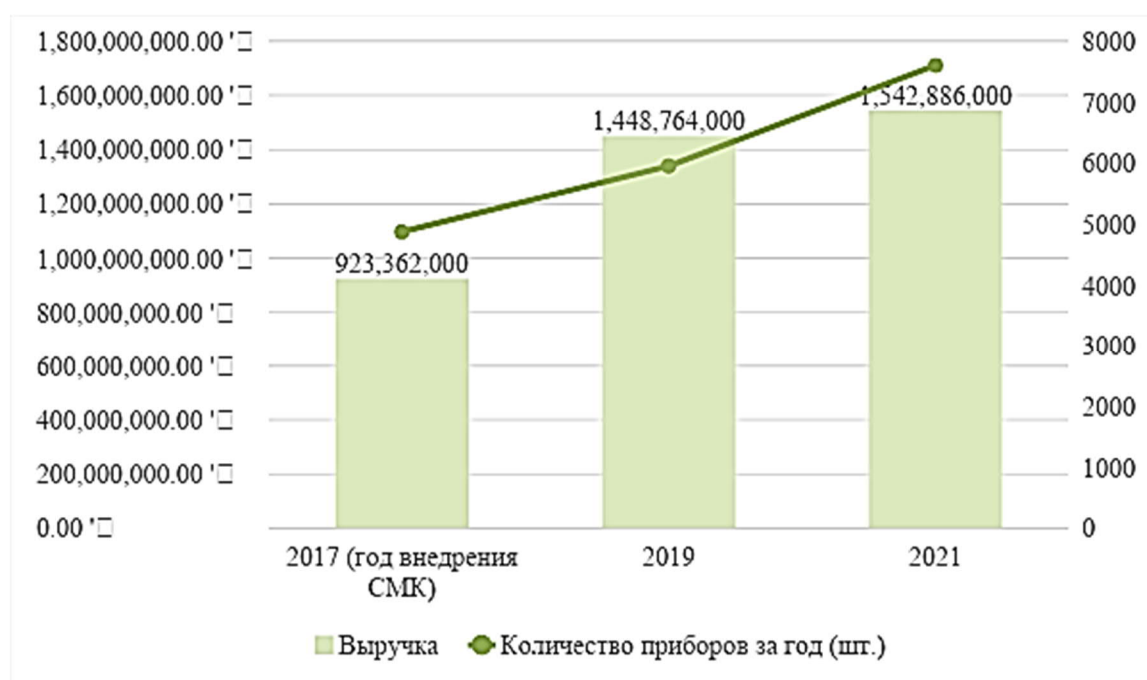


Рис. 3. Динамика объема выпускаемой продукции (в натуральном выражении) и выручки в ЗАО «ЭМИС»
Fig. 3. Trends in the output (in kind) and receipts of CJSC EMIS

Закключение

Подводя итоги, хочется отметить, что даже в случае частичной реализации предложенный подход по внедрению СМК даст положительный результат и позволит организациям оптимизировать процессы, улучшить качество выпускаемой продукции, реализовать выбранную стратегию и достигнуть намеченных целей.

Список источников

1. Латышенко Г.И. Научно-технические технологии и их роль в современной экономике России // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета. 2009. №3. С. 136-141.
2. Денисова Я.В., Сопин В.Ф., Качмаржик А.А. Построение инновационной СМК и ее функционирование с использованием цифровой платформы // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2021. Т. 83. Вып. 1. С. 483-489.
3. Розанова Н.М. Экономика отраслевых рынков. Практикум: учеб. пособие для бакалавров. М.: Юрайт, 2012.
4. Перетолчин А. Четыре главные ошибки при внедрении СМК [Электронный ресурс]. URL: <https://kachestvo.pro/kachestvo-upravleniya/sistemy-menedzhmenta/chetyre-glavnye-oshibki-pri-vnedrenii-smk/> (свободный, дата обращения 31.10.2022).
5. Разработка и внедрение СМК: топ 10 типичных ошибок [Электронный ресурс]. URL: [https://www.nice-consulting.ru/knowledge-base/articles/razrabotka-i-](https://www.nice-consulting.ru/knowledge-base/articles/razrabotka-i-vnedrenie-smk-top-10-tipichnyx-oshibok/)

[vnedrenie-smk-top-10-tipichnyx-oshibok/](#) (свободный, дата обращения 31.10.2022).

6. Типовые ошибки при разработке и внедрении СМК [Электронный ресурс]. URL: <https://quality.eup.ru/DOCUM3/t-osh.htm> (свободный, дата обращения 31.10.2022).
7. Ошибки в системе менеджмента качества 9000 на этапе внедрения и разработки [Электронный ресурс]. URL: <https://standartno.by/blog/articles/management-system/qms-iso-9001/oshibki-v-sisteme-menedzhmenta-kachestva-9000-na-etape-vnedreniya-i-razrabotki/#oshibki-sistemy-menedzhmenta-kachestva-9000-pri-razrabotke> (свободный, дата обращения 31.10.2022).
8. Дранкова Н.А. Оценка системы менеджмента качества // Современные материалы, техника и технология: матер. Междунар. науч.-практ. конф. Курск, 2011. С. 110-114.
9. Анализ проблемы [Электронный ресурс]. URL: http://requirements.ru/lections_25 (свободный, дата обращения 08.11.2022).
10. Новаторство в отношении регионального качества [Электронный ресурс]. URL: <https://www.quality.eup.ru/MATERIALY13/novator-region.htm?ysclid=lcuspixy173971140>
11. Бек Дон Эдвард, Коун Кристофер К. Спиральная динамика. Управляя ценностями, лидерством и изменениями в XXI веке. М.: Открытый мир, 2010. 419 с.
12. Сколько времени занимает внедрение системы менеджмента качества, основанной на ISO 9001? [Электронный ресурс]. URL: <https://1cert.ru/vopros-otvet/skolko-vremeni-zanimaet-vnedrenie-smk> (свободный, дата обращения 08.11.2022).

13. Михайлова Н., Федорова Л. Герою нашего времени должен стать рачительный хозяин // Стандарты и качество. 2010. №4. С. 82-87.

References

1. Latyshenko G.I. Knowledge intensive technologies and their role in the modern economy of Russia. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta* [Vestnik of Siberian State Aerospace University]. 2009;(3):136-141. (In Russ.)
2. Denisova Ya.V., Sopin V.F., Kachmarzhik A.A. Building an innovative QMS and its functioning using digital platform. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy* [Proceedings of Voronezh State University of Engineering Technologies]. 2021;83(1):483-489. (In Russ.)
3. Rozanova N.M. *Ekonomika otraslevykh rynkov. Praktikum: ucheb. posobie dlya bakalavrov* [Economics of industrial markets. Practical course: study guide for bachelors]. Moscow: Yurait; 2012. (In Russ.)
4. Peretolchin A. Four main mistakes in the introduction of QMS. Available at: <https://kachestvo.pro/kachestvo-upravleniya/sistemy-menedzhmenta/chetyre-glavnye-oshibki-pri-vnedrenii-smk/> (Accessed on October 31, 2022).
5. Development and implementation of QMS: Top 10 typical mistakes. Available at: <https://www.nice-consulting.ru/knowledge-base/articles/razrabotka-i-vnedrenie-smk-top-10-tipichnykh-oshibok/> (Accessed on October 31, 2022).
6. Typical mistakes in the development and introduction of QMS. Available at: <https://quality.eup.ru/DOCUM3/t-osh.htm> (Accessed on October 31, 2022).
7. Mistakes in quality management system 9000 at the stage of introduction and development. Available at: <https://standartno.by/blog/articles/management-system/qms-iso-9001/oshibki-v-sisteme-menedzhmenta-kachestva-9000-na-etape-vnedreniya-i-razrabotki/#oshibki-sistemy-menedzhmenta-kachestva-9000-pri-razrabotke> (Accessed on October 31, 2022).
8. Drankova N.A. Evaluation of the Quality Management System. Modern Materials, Engineering and Technology: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. Kursk; 2011:110-114. (In Russ.)
9. Problem analysis. Available at: http://requirements.ru/lections_25 (Accessed on November 08, 2022).
10. Innovating regional quality. Available at: <https://www.quality.eup.ru/MATERIALY13/novator-region.htm?ysclid=lcuspixr173971140>
11. Beck Don Edward, Cowan Christopher C. *Spiralnaya dinamika. Upravlyaya tsennostyami, liderstvom i izmeneniyami v XXI veke* [Spiral dynamics: Mastering values, leadership and change in the 21st century]. Moscow: Otkrytyi Mir; 2010. 419 p. (In Russ.)
12. How long does it take to introduce the quality management system based on ISO 9001? Available at: <https://1cert.ru/vopros-otvet/skolko-vremeni-zanimaet-vnedrenie-smk> (Accessed on November 08, 2022).
13. Mikhailova N., Fedorova L. A hero of our time should become a prudent owner. *Standarty i kachestvo* [Standards and Quality]. 2010;(4):82-87. (In Russ.)

Поступила 25.01.2023; принята к публикации 20.02.2023; опубликована 27.03.2023
Submitted 25/01/2023; revised 20/02/2023; published 27/03/2023

Дранкова Наталья Александровна – аспирант кафедры аналитической химии, сертификации и менеджмента качества, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия. Email: drankova.n.a@mail.ru.

Денисова Яна Владимировна – кандидат экономических наук, доцент кафедры аналитической химии, сертификации и менеджмента качества, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия. Email: yana-denisova@inbox.ru.

Natalia A. Drankova – postgraduate student, Department of Analytical Chemistry, Certification and Quality Management, Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia. Email: drankova.n.a@mail.ru.

Yana V. Denisova – PhD (Economics), Associate Professor, Department of Analytical Chemistry, Certification and Quality Management, Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia. Email: yana-denisova@inbox.ru.

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

УДК 658.562

DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-1-74-81



АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ИЕРАРХИЧЕСКИХ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МЕТОДОВ В КОНТРОЛЕ КАЧЕСТВА

Прыткова Е.А., Давыдов В.М.

Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Россия

Аннотация. Актуальность. Сегодня к изделиям массового производства предъявляются достаточно высокие требования к качеству. С целью оперативного управления технологическим процессом при изготовлении изделий необходимо своевременно получать объективную информацию. Однако сейчас это является определенной проблемой, которая возникает по причине того, что для этого следует принимать во внимание достаточно большое количество факторов, которые приводят к появлению причин потери качества изделия. По этой причине сегодня необходимы современные методы, способные решить указанную проблему. **Цель работы.** В рамках данного исследования авторы ставят целью проведение анализа особенностей применения иерархических нейронных сетей для оценки качества изделий. **Используемые методы.** В статье используются общенаучные методы и методы математического анализа, прежде всего подходы и методы системного анализа и общей теории систем, анализ и синтез, а также сравнения и обобщения. Использование представленных методов позволило провести критический анализ точек зрения на особенности применения иерархических нейросетевых методов в контроле качества. **Новизна.** Представлен авторский анализ применения иерархических нейросетевых методов с целью контроля качества изделий. **Результаты.** Управление качеством изделий массового производства с применением иерархических нейросетей представляется эффективным, что доказывается сегодня рядом исследований. Этот метод применяется в различных областях деятельности, в том числе и в машиностроении. Сделаны выводы о возможностях нейросетевого метода, его преимуществах и недостатках. **Практическая значимость.** Результаты работы могут быть использованы предприятиями с целью контроля качества производимых изделий.

Ключевые слова: качество продукции, иерархические нейронные сети, нейрон, автоматизация, персептрон

© Прыткова Е.А., Давыдов В.М., 2023

Для цитирования

Прыткова Е.А., Давыдов В.М. Анализ применения иерархических нейросетевых методов в контроле качества // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №1. С. 74-81. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-74-81>



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

ANALYSIS OF THE USE OF HIERARCHICAL NEURAL NETWORK METHODS IN QUALITY CONTROL

Prytkova E.A., Davydov V.M.

Pacific National University, Khabarovsk, Russia

Abstract. Relevance. Today, quite high quality requirements are imposed on mass-produced products. To exercise operational control of the technological process, when manufacturing products, it is necessary to receive objective information timely. However, now this is a certain problem that arises due to the fact that it is necessary to take into account a sufficiently large number of factors that lead to causes of loss of product quality. Thus, there is a current need for modern methods that can solve this problem. **Objectives.** Within the framework of this study, the authors aim to analyze the features of the use of hierarchical neural networks to assess the quality of products. **Methods Applied.** The article describes general scientific and mathematical analysis methods, primarily approaches and methods of a system analysis and a general theory of systems, analysis and synthesis, as well as comparisons and generalizations. The presented methods made it possible to conduct a critical analysis of the points of view on the peculiarities of the use of hierarchical neural network methods in quality control. **Originality.** The article presents the authors' analysis of the application of hierarchical neural network methods for product quality control. **Result.** Quality management of mass-produced products using hierarchical neural networks seems to be efficient, which is proved today by a number of studies. This method is used today in various fields of activity, including mechanical engineering. The article contains the conclusions drawn about the possibilities of the neural network method, its advantages and disadvantages. **Practical Relevance.** The results of the study can be used by enterprises for quality control of manufactured products.

Keywords: product quality, hierarchical neural networks, neuron, automation, perceptron

For citation

Prytkova E.A., Davydov V.M. Analysis of the Use of Hierarchical Neural Network Methods in Quality Control. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 1, pp. 74-81. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-74-81>

Введение и постановка задачи

Оценка качества изделий сегодня является достаточно актуальной проблемой, которая требует постоянного поиска новых способов и методов. На сегодняшний день достаточно часто применяются информационные базы, которые основаны на разработке комплексов математических и информационно-аналитических моделей. При использовании математических моделей применяются методы корреляционного и регрессионного анализа. На производственных участках такие методы применить сегодня уже несложно. Основной задачей при этом является получение случайных данных, которые будут правильно распределены исходя из параметров качества производства изделий.

Одним из наиболее эффективных методов использования таких моделей является метод искусственных нейронных сетей (ИНС). Выполненные ранее исследования [8, 11, 12] показывают, что для решения задачи оценки качества изделий данный метод используется очень часто. Эффективность применения представленных методов для решения задач обеспечения качества подтверждается результатами научно-исследовательской и практической деятельности.

В данной статье анализируется применение метода искусственных нейронных сетей для оценки качества изделия, делаются выводы о преимуществах и недостатках такого метода.

Материалы и методы исследования

В статье используются общенаучные методы и методы математического анализа, прежде всего подходы и методы системного анализа и общей теории систем, анализ и синтез, а также сравнения и обобщения. Использование представленных методов позволило провести критический анализ точек зрения на особенности применения иерархических нейросетевых методов в контроле качества.

Полученные результаты и их обсуждение

Для многих ученых и специалистов в области управления качеством технологических процессов понятие нейронных сетей и применения нейросетевых технологий является малоизученным. В первую очередь необходимо объяснить понятие нейронных сетей.

Согласно одному из основных определений эти сети представляет собою метод моделирования, с помощью которого можно воспроизводить

сложные нелинейные зависимости. Обработка информации в такой модели происходит параллельно распределенной структуре и состоит из нейронов, связанных между собой связями [2].

На **рис. 1** представлены свойства нейронных сетей (составлено на основании [8, с. 37]).

В случае наличия большого числа переменных между параметрами с нелинейными связями можно с помощью метода искусственных нейронов смоделировать сложный технологический процесс. Использование такого метода сегодня широко распространено в различных сферах и отраслях, в том числе в управлении технологическими процессами в рамках определения качества изделий.

Использование нейронных сетей является одним из современных и мощных инструментов управления качеством продукции, процессов и

услуг, который может совершенствовать свою прогностическую способность с ее параллельным обучением. При использовании нейронных сетей существует возможность осуществлять управление качеством продукции посредством предупреждения потенциального возникновения ситуации (риска), влекущей за собой несоответствие продукции, процессов и услуг. При этом возможно определять корреляцию возникновения такой ситуации с взаимосвязанными факторами (а также их идентификацию) и на основании данной информации принимать решения.

Искусственный нейрон является основным элементом нейронных сетей. Он считается прямым аналогом биологического нейрона, только представлен в виде математической модели. Схематически структура искусственного нейрона представлена на **рис. 2**.



Рис. 1. Свойства нейронных сетей

Fig. 1. Properties of neural networks

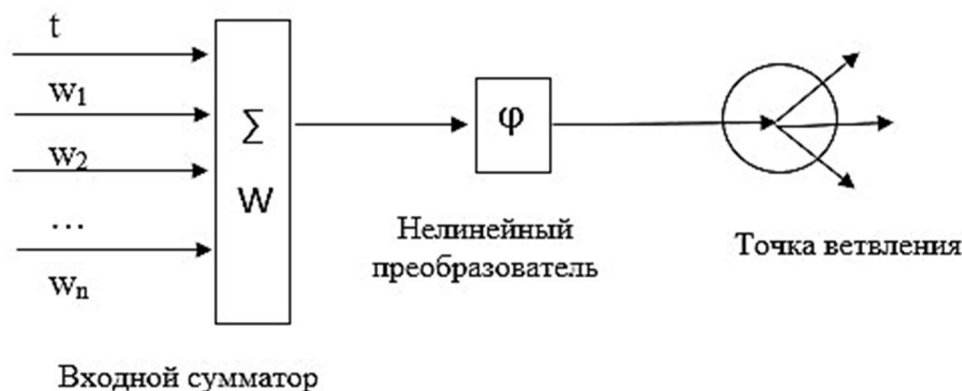


Рис. 2. Схема искусственного нейрона
Fig. 2. Diagram of an artificial neuron

Особенность этой модели в том, что она характеризуется наличием нескольких входов и имеет только один выход. Усиление сигнала возможно за счет индивидуального коэффициента, который индивидуален для каждого входа. Активная функция нейрона возникает на основании суммирования входных возбудителей в теле нейрона [10, с. 43].

Перед тем как построить искусственную нейронную сеть, необходимо подготовить все данные. Их получение происходит на каждом этапе технологической операции во время измерения параметров качества. Увеличить скорость обучения нейронной сети можно при устранении параметров, которые заметно выделяются в сравнении с другими. Функция нейрона в дальнейшем влияет на выбор границ масштабирования. При этом в зависимости от того, какое масштабирование было на входе, будет зависеть, какими будут параметры на выходе.

Построение ИНС возможно только после завершения всех предыдущих этапов. Сам указанный процесс предполагает выбор типа нейронной сети и подбор весов. Обычно выделяют три основных типа нейронных сетей, отличающихся структурой и назначением:

- иерархические сети;
- локальные сети;
- дивергентные сети с одним входом.

Все они отличаются между собой видом передачи информации.

Многочисленное дублирование информационных путей, являющееся решающим фактором, обеспечивается за счет сочетания конвергентных и дивергентных соединений.

Последовательное формирование уровней иерархического представления сети определяет

конечную цель. При этом такое станет возможным только тогда, когда на каждом из шагов будет сделан выбор подмножества элементов, что в итоге приведет к полному покрытию ними сети.

Адаптивная система иерархической архитектуры, которая анализируется, состоит из P_s иерархических уровней, каждому из которых свойственен ряд элементов L_p -компонентов (нейронных сетей). Любым из компонентов, передающим векторы выходных сигналов, могут получаться векторы входных сигналов [4].

Идентификация каждого компонента происходит на основании двух индексов (p, l) ($1 \leq p \leq P_s$, $1 \leq l \leq L_p$). Сверху вниз происходит нумерация иерархических уровней. Номер верхнего уровня – 1, а номер нижнего – P_s .

Если есть необходимость построения произвольной структуры связей в иерархической системе, то используют матрицы или таблицы.

Индекс, компонента рассматриваемой системы – (p, l) .

Векторы выходных сигналов $(\bar{\alpha}_v^{r,m})$, будут представлены индексами (r, m) ($1 \leq r \leq P_s$, $1 \leq m \leq L_p$). Здесь (v) ($1 \leq v \leq V^{p,l}$) – номер вектора входных сигналов для компонента (p, l) , а $V^{p,l}$ – общее число векторов входных сигналов для компонента (p, l) .

Тогда входные векторы для компонента (p, l) формируются объединением векторов $(\bar{\alpha}_v^{r,m})$:

$$\bar{B}^{p,l} = \bigcup_{v=1}^{V^{p,l}} \bar{\alpha}_v^{r,m}. \quad (1)$$

Рассмотрим пример конкретной реализации иерархической архитектуры (рис. 3).

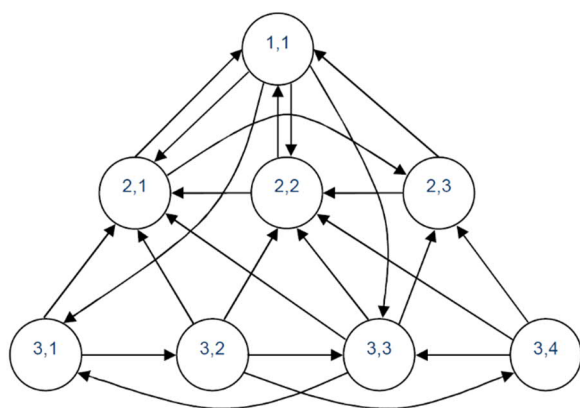


Рис. 3. Пример трехуровневой иерархической архитектуры из восьми нейросетей (векторы внешних входных сигналов не показаны)

Fig. 3. An example of a three-level hierarchical architecture of eight neural networks (vectors of external input signals are not shown)

Если говорить о работе обучающего алгоритма, то он не зависит от выбора вида нелинейности нейрона, что может происходить вообще в произвольном порядке [4].

Таблицы индексов влияющих компонентов для каждого из уровней иерархии на рис. 3 будут выглядеть следующим образом (табл. 1-3).

Таблица 1. Индексы влияющих компонентов (r, m) 1-го уровня иерархии ($p = 1$)

Table 1. Indexes of influencing components (r, m) of the 1st level of the hierarchy ($p = 1$)

p	1		
l	1		
v	1	2	3
r	2	2	2
m	1	2	3

Таблица 2. Индексы влияющих компонентов (r, m) 2-го уровня иерархии ($p = 2$)

Table 2. Indexes of influencing components (r, m) of the 2nd level of the hierarchy ($p = 2$)

p	2											
l	1					2					3	
v	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2
r	1	2	3	3	3	1	2	3	3	3	2	3
m	1	2	1	2	3	1	3	2	3	4	1	3

Таблица 3. Индексы влияющих компонентов (r, m) 3-го уровня иерархии ($p = 3$)

Table 3. Indexes of influencing components (r, m) of the 3rd level of the hierarchy ($p = 3$)

p	3						
l	1		2	3			4
v	1	2	1	1	2	3	1
r	1	3	3	1	3	3	3
m	1	3	1	1	2	4	2

В случае определения размера подмножества его лучше делать наименьшим. То есть число смежных элементов рекомендуется брать небольшое. Причина такой ситуации в том, что возможно экспоненциальное увеличение размера обучающейся выборки за счет того, что произойдет рост вершины и, как итог, рост длины вектора.

Когда происходит определение типа сети, то обращают внимание прежде всего на достаточно изученные архитектуры, такие как нейронные сети с регрессией, сети Кохонена.

Определение функции активации, а также числа слоев сети и нейронов в каждом из таких слоев происходит на этом этапе. Определение входящих параметров при этом считается одним из самых важных моментов, так как это будет определять те параметры, которые появятся на выходе.

Подбор весов происходит на основании обучения той архитектуры, которая была выбрана. Настройка их происходит на основании специальных алгоритмов, в числе которых можно выделить метод обратного распространения ошибки. Обязательным в этом случае будет наличие массива входных и выходных данных. Сформировать их можно за счет измерения параметров качества изделий на разных этапах технологического процесса. Эти параметры представлены в контрольных картах или листках. От полноты исходных данных будет зависеть качество обучения искусственной нейронной сети.

Следует также обратить внимание на средства САПР [6], с помощью которых проводятся сложные вычисления и появляется возможность обрабатывать большое количество информации. В случае использования САПР при создании набора базовых программных моделей-блоков полезными становятся именно нейросетевые технологии.

Также стоит обратить внимание и на программные пакеты моделирования. Среди наиболее известных и доступных программных пакетов моделирования и анализа данных, включающих нейросетевую методику, следует выделить STATISTICA (Statsoft, США) [14, с. 18].

С помощью иерархических нейронных сетей сегодня стало возможным проводить оценку качества продукции.

Трехслойный персептрон с определенными характеристиками – это вид нейронной сети, который можно разработать, имея в наличии данные предварительного анализа разных моделей ИНС.

Нелинейная функция активации в данном случае – сигмоидальная функция $p(s) = 1/(1+\exp(-as))$ с параметром $a = 1$.

Структура нейронной сети представлена на рис. 4.

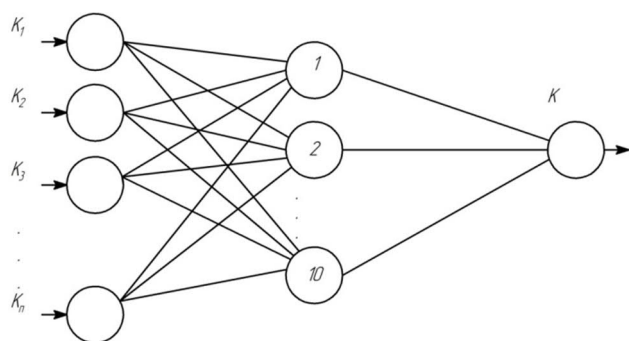


Рис. 4. Структура нейронной сети
Fig. 4. Neural network structure

Если говорить про оценку качества изделия с помощью нейросетевых моделей, реализация которых происходит с помощью программного обеспечения, то наиболее подходящей является STATISTICA Automated Neural Networks (SANN). В STATISTICA Automated Neural Networks (SANN) реализованы мощные и оптимизированные алгоритмы обучения нейронных сетей. В том числе здесь стоит отметить такие методы, как методы сопряженных градиентов, алгоритм Левенберга-Маркара, BFGS, алгоритм Кохонена.

Механизм контрольной кросс-проверки применяется в случае необходимости решения проблемы переобучения.

Среди возможностей STATISTICA можно выделить генерацию исходного системного программного кода на различных языках программирования. Использование кода позволяет интегрировать нейросетевой анализ в независимые внешние приложения.

В SAAN применяется кластерный анализ, который проводится с помощью сетей Кохонена.

На рис. 5 представлены слои сети Кохонена.

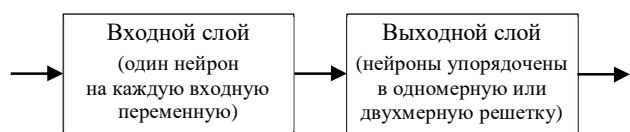


Рис. 5. Слои сети Кохонена
Fig. 5. Kohonen network layers

С помощью метода последовательных приближений происходит обучение сети Кохонена. Алгоритм улучшается с целью лучшего улова кластеризации обучаемых данных. При этом в процессе обучения принимают участие нейроны входного слоя.

На рис. 6 представлен пример ИНС, которая была построена на основании трех входных параметров и имеет три выходных прогнозируе-

мых параметра качества изделия (Примечание. Архитектура: МП 3:3-10-3:3 N = 80. Производительность обучения = 0,024980 Контр. Производительность = 0,022427 Тест. Производительность = 0,999973).

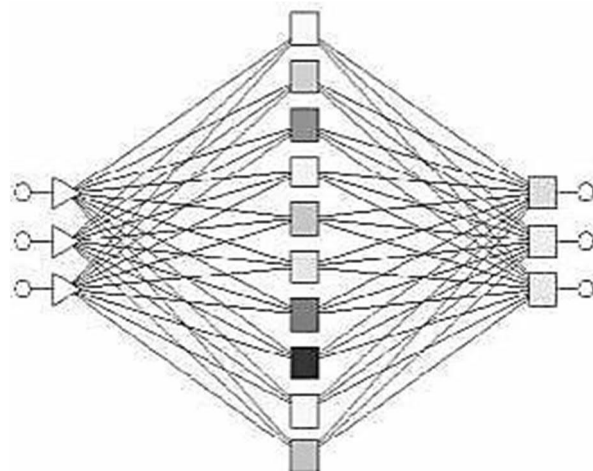


Рис. 6. Пример архитектуры ИНС
Fig. 6. Hierarchical neural network architecture for reference

Оператор, после того как получил данные по прогнозу качества, должен занести их в программу. Совместно со службой управления качеством оператор на основании прогнозных данных по качеству делает сравнение с допустимыми значениями. Проведение анализа необходимо в том случае, если будет установлено, что прогнозные данные находятся за пределами допустимых значений. Кроме этого, с целью улучшения качества готовой продукции изделия со значениями, выходящими за пределы, убираются. Только в случае положительных значений происходит переход на дальнейший этап.

На основании представленной информации можем выделить ряд преимуществ и недостатков использования нейронных сетей (рис. 7).



Рис. 7. Преимущества и недостатки нейронных сетей
Fig. 7. Advantages and disadvantages of neural networks

Для создания прогноза по показателям качества продукции в разных сферах необходимо использование высокоэффективной интеллектуальной технологии, а именно нейросетей.

Заключение

Таким образом, проблема оценки качества изделия в технологическом процессе является сегодня достаточно актуальной. Для ее решения исследователи и практики постоянно находятся в поиске различных решений, одним из которых является метод нейронных сетей. Нейросетевые технологии в машиностроении предоставляют большие возможности для поиска эффективных решений широкого спектра задач.

Подводя итог вышеизложенному, следует отметить, что управление качеством изделий массового производства с применением иерархических нейросетей представляется эффективным, что доказывается рядом исследований. Этот метод сегодня применяется в различных областях деятельности, в том числе и машиностроении. Метод нейронных сетей имеет как преимущества, так и недостатки, которые показаны выше. Использование иерархии значительно расширяет возможности существующих нейросетей.

Список источников

1. Grzegorz Kłosowski, Jerzy Lipski. The_Use_of_Transfer_Learning_with_Very_Deep_Convolutional_Neural_Network_in_Quality_Management <https://www.researchgate.net/publication/352441525>.
2. Tian Wang, Yang Chen, Meina Qiao, Hichem Snoussi. A fast and robust convolutional neural network-based defect detection model in product quality control // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018, vol. 94, pp. 3465-3471.
3. Lankin J.P., Baskanova T.F. Algorithms of self-adaptation for atmospheric model designing // SPIE. 2004, vol. 5397, pp. 260-270.
4. Басканова Т.Ф., Ланкин Ю.П., Комиссаров С.В. Иерархические нейронные сети как средство решения трудноформализуемых задач искусственного интеллекта // Искусственный интеллект. 2009. №1. С. 100-111.
5. Всемирная О.С., Шиханов К.А., Самойлова Е.М. Интеллектуальный анализ качества поверхности деталей с помощью нейросетевого метода многослойного персептрона // Инновационный потенциал развития науки в современном мире: достижения и инновации: сб. ст. по материалам I международной научно-практической конференции. Уфа, 2019. С. 25-29.
6. Давыдов В.М., Кузнецов Д.И. Нейросетевой кластерный анализ деталей в условиях САПР // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2004. №2. С. 43-46.

7. Давыдов В.М., Шлапаков С.И., Кривошеев И.А. К вопросу о структуре нейронных сетей в системах распознавания образов // Проектирование технологических машин: сб. науч. тр. Вып. 15. М.: Станкин, 1999. С. 25-30.
8. Демкин В.А. Основы нейросетевых методов прогнозирования // Наука и мир. 2018. № 4-1 (56). С. 36-39.
9. Лунёва Е.А. Искусственные нейронные сети. Методы обучения нейронной сети // Интеллектуальные информационные системы: тенденции, проблемы, перспективы: материалы докладов VI всероссийской очной научно-практической конференции «ИИС-2018». Юго-Западный государственный университет. Курск, 2018. С. 99-101.
10. Пономарева К.А. Применение искусственных нейронных сетей при решении задач прогнозирования // Наука без границ. 2020. № 1 (41). С. 42-47.
11. Рожков И.А., Иващенко В.А. Идентификация дефектов поверхностного слоя деталей подшипников с помощью искусственной нейронной сети // Материалы всероссийской научно-практической конференции молодых ученых. Саратов, 2018. Т. 1. С. 72-74.
12. Ручай А.Н. Новое в развитии общества: нейронные сети и искусственный интеллект // Научная парадигма цивилизации в XXI веке. Капитализм, социализм и четвертая технологическая революция: сб. аннот. докл. Десятого Междунар. конгресса передовых наук / под ред. В.И. Бархатова, Д.А. Плетнёва. Челябинск, 2018. С. 75.
13. Черепанов Ф.М. Методы повышения эффективности нейросетевых систем в условиях ограниченных объемов выборок со сложными корреляционными связями // Прикладная математика и вопросы управления. 2019. № 2. С. 40-61.
14. Ямашкин С.А. Проектирование нейросетевых моделей посредством методов визуального программирования // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2021. № 3(59). С. 14-24.

References

1. Grzegorz Kłosowski, Jerzy Lipski. The use of transfer learning with very deep convolutional neural network in quality management. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/352441525>.
2. Tian Wang, Yang Chen, Meina Qiao, Hichem Snoussi. A fast and robust convolutional neural network-based defect detection model in product quality control. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018;94:3465-3471.
3. Lankin J.P., Baskanova T.F. Algorithms of self-adaptation for atmospheric model designing. SPIE. 2004;5397:260-270.
4. Baskanova T.F., Lankin Yu.P., Komissarov S.V. Hierarchical neural networks as a means of solving difficult-to-formalize tasks of artificial intelligence. *Iskusstvennyy intellekt* [Artificial Intelligence]. 2009;(1):100-111. (In Russ.)

5. Vsemirnaya O.S., Shikhanov K.A., Samoilova E.M. Intelligent analysis of the surface quality of parts using the neural network method of multilayer perceptron. Innovative Potential of Development of Science in the Modern World: Achievement and Innovations. Collection of Articles Based on the Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference. Ufa; 2019;25-29. (In Russ.)
6. Davydov V.M., Kuznetsov D.I. Neural network cluster analysis of parts in CAD. *Vestnik kompyuternykh i informatsionnykh tekhnologii* [Bulletin of Computer and Information Technologies]. 2004;(2):43-46. (In Russ.)
7. Davydov V.M., Shlapakov S.I., Krivosheev I.A. On the structure of neural networks in image recognition systems. *Proektirovanie tekhnologicheskikh mashin: Sbornik nauchnykh trudov. Vypusk 15* [Designing Technological Machines: Collection of Scientific Papers. Issue 15]. Moscow: STANKIN Moscow State University of Technology; 1999;25-30. (In Russ.)
8. Demkin V.A. Fundamentals of neural network forecasting methods. *Nauka i mir* [Science and World]. 2018;(4-1(56)):36-39. (In Russ.)
9. Luneva E.A. Artificial neural networks. Neural network training methods. Intelligent Information Systems: Trends, Problems, Prospects. Proceedings of the 6th All-Russian Offline Scientific and Practical Conference IIS -2018. Kursk: Southwest State University; 2018;99-101. (In Russ.)
10. Ponomareva K.A. Application of artificial neural networks in solving forecasting problems. *Nauka bez granits* [Science Without Borders]. 2020;(1(41)):42-47. (In Russ.)
11. Rozhkov I.A., Ivashchenko V.A. Identification of defects in the surface layer of bearing parts using an artificial neural network. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference of Young Scientists. Saratov; 2018;1:72-74. (In Russ.)
12. Ruchai A.N. New development of society: neural networks and artificial intelligence. Scientific Paradigm of the Civilization in the 21st Century: Capitalism, Socialism and the Fourth Technological Revolution. Collection of Papers of the Tenth International Congress of Advanced Sciences. Chelyabinsk; 2018;75. (In Russ.)
13. Cherepanov F.M. Methods of increasing efficiency of neural network systems in limited sample volumes with complicated correlations. *Prikladnaya matematika i voprosy upravleniya* [Applied Mathematics and Management Issues]. 2019;(2):40-61. (In Russ.)
14. Yamashkin S.A. Designing neural network models by visual programming methods. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Povolzhskii region. Tekhnicheskie nauki* [News of Higher Educational Institutions. Volga Region. Engineering Sciences]. 2021;(3(59)):14-24. (In Russ.)

Поступила 03.02.2023; принята к публикации 27.02.2023; опубликована 27.03.2023
Submitted 03/02/2023; revised 27/02/2023; published 27/03/2023

Прыткова Евгения Андреевна – аспирант, старший преподаватель кафедры технологической информатики и информационных систем, Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Россия. Email: ev-prutkova@mail.ru.

Давыдов Владимир Михайлович – доктор технических наук, профессор кафедры технологической информатики и информационных систем, Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Россия. Email: davellut@mail.ru.

Evgeniya A. Prytkova – postgraduate student, Senior Lecturer, Department of Technological Informatics and Information Systems, Pacific National University, Khabarovsk, Russia. Email: ev-prutkova@mail.ru.

Vladimir M. Davydov – DrSc (Eng.), Professor, Department of Technological Informatics and Information Systems, Pacific National University, Khabarovsk, Russia. Email: davellut@mail.ru.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

MODELLING OF METALLURGICAL PROCESSES

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

УДК 621.1-1/-9

DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-1-82-92

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ДЛЯ ПЕЧАТИ ЛОПАТОК ТУРБИН
НА 3D-ПРИНТЕРЕЕрошенко В.О.¹, Малькова М.Ю.¹, Задиранов А.Н.², Мещеряков А.В.²¹ Российский университет дружбы народов, Москва, Россия² Академия государственной противопожарной службы МЧС России, Москва, Россия

Аннотация. Целью работы является разработка модели для печати лопаток турбин на 3D-принтере, что особенно актуально при изготовлении деталей сложной геометрической формы, испытывающих воздействие значительных статических, динамических, тепловых нагрузок и работающих в агрессивных средах. Большой разброс механических свойств, который может возникнуть в результате недостаточной подготовки к аддитивному изготовлению детали, указывает на необходимость моделирования с целью прогнозирования механических свойств лопатки газотурбинного двигателя. Таким образом, становится очевидно, что применение моделирования механических испытаний и свойств 3D-печатных объектов является необходимым условием изготовления качественных деталей. Основной задачей исследования является разработка модели лопатки газотурбинного двигателя, обладающей достаточной прочностью, устойчивостью к вибрационным нагрузкам, температурным колебаниям, которая при этом будет сохранять траекторию движения в потоке и обладать минимально возможной массой. Построена трехмерная компьютерная модель для печати лопаток газовых турбин на 3D-принтере. Разработано критериальное и алгоритмическое сопровождение процесса печати лопаток турбин на 3D-принтере. Получена модель распределения теплового поля детали при ее изготовлении с использованием программного комплекса Ansys. Моделирование температурного поля необходимо не только для оценки плотности детали и ее сплошности, но и реакции металла изделия на быстрый нагрев и охлаждение. Получена модель напряженно-деформационного состояния в синтезируемом изделии. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными свидетельствует о валидации разработанной модели. Предлагаемый подход к моделированию позволяет спрогнозировать зоны возникновения максимального напряжения, которое может привести к появлению точки возникновения трещины в изделии.

Ключевые слова: лопатка газотурбинного двигателя, аддитивные технологии, оптимизация, моделирование, 3D-печать

© Ерошенко В.О., Малькова М.Ю., Задиранов А.Н., Мещеряков А.В., 2023

Для цитирования

Разработка модели для печати лопаток турбин на 3D-принтере / Ерошенко В.О., Малькова М.Ю., Задиранов А.Н., Мещеряков А.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №1. С. 82-92. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-82-92>



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

DEVELOPMENT OF A MODEL FOR 3D PRINTING OF TURBINE BLADES

Eroshenko V.O.¹, Malkova M.Yu.¹, Zadiranov A.N.², Meshcheryakov A.V.²

¹ Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

² State Fire Fighting Service Academy of EMERCOM of Russia, Moscow, Russia

Abstract. The study is aimed at developing a model for printing turbine blades on a 3D printer, which is especially important, when manufacturing complex geometry parts exposed to significant static, dynamic, thermal loads and operating in aggressive environment. A wide spread of mechanical properties, which may arise as a result of insufficient preparation for additive manufacturing of parts, indicates the need for modeling to forecast mechanical properties of a gas turbine engine blade. Thus, it becomes obvious that the use of simulation of mechanical tests and properties of 3D printed objects is a prerequisite for manufacturing high-quality parts. A main objective of the study is to develop a model of a gas turbine engine blade that has sufficient strength, resistance to vibration loads, temperature fluctuations, while maintaining the trajectory of movement in the flow and having minimum possible weight. The authors designed a three-dimensional computer model for printing gas turbine blades on a 3D printer and developed criteria and algorithm support of the process of printing turbine blades. A model of the distribution of the thermal field of the part during its manufacturing is designed using the Ansys software suite. It is required to simulate the temperature field to assess not only density of the part and its continuity, but also the reaction of the metal of the product to quick heating and cooling. The authors obtained a model of the stress-strain state in the synthesized product. A comparison of the simulation results with experimental data indicates validation of the developed model. The proposed approach to modeling makes it possible to forecast zones of maximum stress, which can lead to a crack point in the product.

Keywords: gas turbine engine (GTE) blade, additive technologies, optimization, modeling, 3D printing

For citation

Eroshenko V.O., Malkova M.Yu., Zadiranov A.N., Meshcheryakov A.V. Development of a Model for 3D Printing of Turbine Blades. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 1, pp. 82-92. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-82-92>

Введение

Все более широкое применение в машиностроительной промышленности аддитивных технологий обусловлено возможностью получения изделий повышенного качества и с заданным набором свойств, что особенно актуально при изготовлении деталей сложной геометрической формы, работающих под воздействием комплекса технологических факторов в высоких пределах степени влияния. Авторами работы поставлена цель перевода в аддитивное производство технологии изготовления лопаток газотурбинного двигателя (ГТД). Любое инновационное практическое решение невозможно без разработки критериальных параметров оптимизации процесса и оценки их влияния на жизненный цикл готовой детали [1-5]. Поэтому важными задачами разработки подобной технологии является поэтапная проработка всех стадий подготовительного этапа к аддитивному изготовлению лопаток ГТД и разработка рабо-

чей модели для печати лопаток турбин на 3D-принтере с учетом всех необходимых требований надежности.

Модель печати лопаток турбин на 3D-принтере подразумевает разработку ряда критериев, которые необходимо соблюсти при получении готовой детали с целью достижения максимальной степени качества. И речь в данном случае идет как о достижении максимального соответствия формы и размеров лопаток, так и о технических стандартах готовых моделей, в том числе характеристиках материала для изготовления готового изделия.

Необходимо выделить ряд управляющих параметров надежности. Ввиду того, что надежность является изменяющейся во времени характеристикой, группа управляющих параметров должна носить исключительно динамический характер и способность к преобразованию, которое не только можно отследить и зафиксировать, но и выделить влияние конкретного фактора на рассматриваемое изделие.

Постановка задачи исследования

Двумерные эффекты давления потока в площади поперечного сечения лопаток ГТД связаны с оптимальной производительностью, достигаемой лопатками турбины. Для плавного вращения лопатки турбины обычно проектируются с имеющимися аэродинамическими профилями [6]. При проектировании толщины и длины хорды лопаток турбины необходимо учитывать конструктивную прочность лопаток. На предварительном этапе создания лопатки турбины необходимо построить трехмерную компьютерную модель. Размер лопатки турбины может быть либо получен из исходных данных (справочников / технических характеристик, заданных производителем), либо рассчитан путем моделирования с учетом геометрической модели и инженерной упругости лопатки турбины. Используемые для моделирования характеристики представлены в табл. 1. Усилие на лопатках турбины измеряется при фиксированной выходной мощности двигателя, а расчетная нагрузка на лопатку используется в качестве условия метода анализа конечных элементов для анализа лопатки ГТД [7].

Таблица 1. Характеристики, используемые для моделирования лопатки ГТД
Table 1. Characteristics used for modeling GTE blades

Наименование	Параметр
Материал	В зависимости от модели ГТД
Количество моделей на разовое использование моделей	До 10 000
Плотность изделия	В зависимости от модели ГТД
Предел текучести	20 МПа
Предел прочности на растяжение	29,6 МПа
Модуль Юнга	2,24 ГПа
Коэффициент Пуассона	0,38
Модуль сдвига	0,811594 ГПа

Кроме того, для моделирования необходим расчет среды, основанный на теории вязкого течения в соответствии с уравнением Рейнольдса (RANS), согласно которому однородный поток для поддержания определенной скорости вокруг гребного винта является типичной трехмерной несжимаемой турбулентной жидкостью [8]. Выражение RANS для всего вычислительного поля потока выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0; \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_i} = \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial (\overline{\rho u_i u_j})}{\partial x_j} + \rho g_i, \quad (2)$$

где ρg_i – осредненные внешние силы; $\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ – вязкостные силы; $\overline{\rho u_i u_j}$ – напряжения Рейнольдса, турбулентные напряжения; ρ – плотность.

Область расчета потока должна включать две части фиксированной и вращающейся области, чтобы обеспечить расчет в нормальном состоянии. Конструкция геометрии 3D-моделирования должна быть задана как неподвижный объект в подвижном, а лопасти турбины установлены во вращение [9]. Набор для моделирования поверхности лопастей определяется как нескользкая поверхность, лопатка турбины, помещенная в поток, и размер лопасти в соответствии с размером аквариума (рис. 1). При моделировании толщина лопатки турбины рекомендована к установке на 2,5 мм, материал набора моделирования не определен.

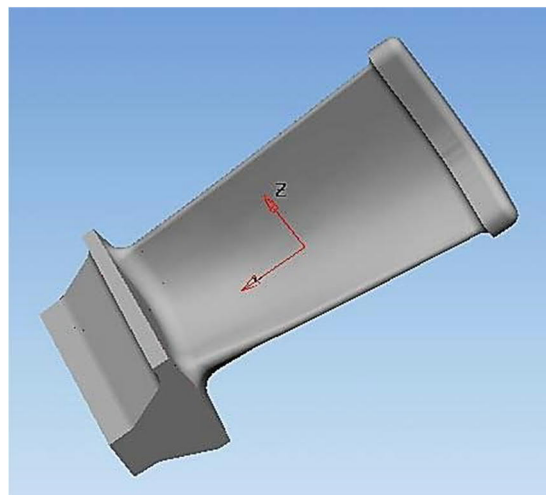


Рис. 1. Пример возможного моделирования лопатки
Fig. 1. An example of a possible blade modeling

Таким образом, процесс создания модели лопатки требует учета не только параметров лопатки, но и внешних воздействий, оказываемых на лопатку.

Материалы и методы исследования

1. Моделирование температурных полей в синтезируемом изделии. При использовании технологии 3D-печати на качество готовой детали преимущественно влияет печатающая головка, которая определяет качество печати [10]. В зависимости от используемого материала ее необходимо нагреть до стабильной температуры от 275°C. Металл или металлический сплав подается в печатающую головку в виде проволоки, обычно диаметром 3 или 1,75 мм. Подача материала на печатающую головку осуществляется приводом, обеспечивающим подачу. Скорость подачи определяется скоростью печатающей головки и выходным диаметром струи по формуле [11]

$$f_f = f_{\min} \frac{d^2}{D^2}, \quad (3)$$

где f_f – скорость подачи материала; f_{\min} – скорость подачи печатающей головки; d – диаметр выходного материала; D – диаметр проволоки.

Исходя из организации процесса получения детали и нахождения ее в камере, можно предположить, что тепловое поле будет распределено так, как показано на **рис. 2** [12].

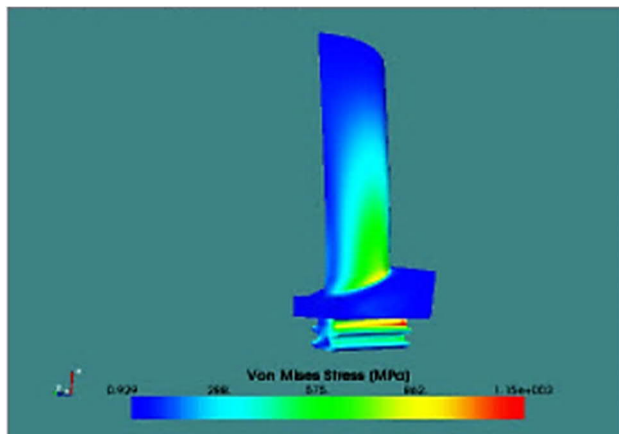


Рис. 2. Распределение теплового поля детали при ее изготовлении

Fig. 2. Distribution of the thermal field of the part during its manufacturing

В глобальной декартовой системе можно определить уравнение теплового потока:

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \ddot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (4)$$

где \ddot{q} – тепло, выделяемое в системе; x, y, z – направление декартовой системы; T – температура в зависимости от координат и времени, °C; K ; t – время, с; c – удельная теплоемкость, Дж · кг⁻¹ · К⁻¹; ρ – плотность, кг · м⁻³; K – теплопроводность, Вт · м⁻¹ · К⁻¹.

Потери энергии из-за излучения можно определить уравнением Сигала-Хауэлла:

$$\sum_{i=1}^N \left(\frac{\delta_{ji}}{\varepsilon_i} - F_{ji} \frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i} \right) \frac{1}{A_i} Q_i = \sum_{i=1}^N (\delta_{ji} - F_{ji}) \rho T_i^4, \quad (5)$$

где N – количество излучающих поверхностей; δ_{ji} – символ Кронекера ($\delta_{ji} = 1$ для $i = j$, иначе $\delta_{ji} = 0$); ε_i – эффективная излучательная способность; F_{ji} – доля энергии, излучаемой от поверхности i к поверхности j ; A_i – площадь поверхности i ; Q_i – потери энергии поверхности i ; δ – постоянная Стефана-Больцмана; T_i – абсолютная температура поверхности i .

Для расчета распределения температурного поля возможно использовать программные комплексы по типу Ansys. Для расчета должен использоваться «установившийся тепловой модуль», так как данный модуль однотипен для программных комплексов такого рода. В первую очередь оценивалось распределение температурного поля внутри изделия [13].

При расчетах необходимо учитывать такие свойства материалов, как теплопроводность и теплоотдача, включая теплообмен между отдельным телом и окружающей средой. Кроме того, результирующая теплопередача зависит от формы тела и характеристик его поверхности.

Прогресс температуры для лопаток рассчитывался исходя из двух вариантов исходных данных [14]:

а) за исходную принималась температура самой печатающей головки;

б) за исходную принималась температура проволоки.

Распределение полей показано на **рис. 3**.

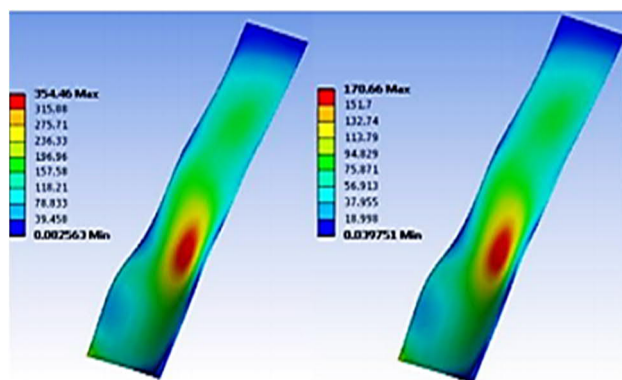


Рис. 3. Распределение тепловых полей в зависимости от пути моделирования

Fig. 3. Distribution of thermal fields depending on the modeling path

На первый взгляд, рисунки практически идентичны, но моделирование по параметру (а) указывает на то, что температурное поле менее равномерно распределено по сечению детали, имеются более контрастные участки. Связано это с конструктивными особенностями головок. Например, для частей печатающей головки, подвергающихся механической нагрузке, вместо материала PTFE может использоваться материал РЕЕК с целью улучшения механических свойств печатающей головки. Оба материала имеют одинаковую теплопроводность и их можно использовать в качестве теплоизоляции металлических частей печатающей головки [15].

Таким образом, моделирование температурного поля необходимо не только для оценки плотности деталей и их сплошности, но и реакции металла на быстрый нагрев и охлаждение [16]. Изучив характеристики температурного поля путем моделирования, можно подобрать характеристики процесса: форсунку подачи материала, характер подачи материала, расстояние до платформы, скорость подачи температуры и другие технологические параметры процесса, которые позволят получить качественный результат даже при работе с новыми деталями. Использование стандартных подходов физического моделирования в сочетании с программными комплексами позволит получить модель и характеристики процесса для достижения оптимального результата.

2. Моделирование напряженно-деформационного состояния в синтезируемом изделии.

На практике доказано, что плотность наполнения и форма существенно влияют на механические свойства образцов лопаток ГТД, созданных с помощью 3D-принтера. Из основ теоретиче-

ской механики и сопромата следует, что прочность на разрыв и эластичность прямо пропорциональна плотности используемого материала и что детали с концентрическими частями внутренней формы имеют самую высокую прочность на разрыв и эластичность среди образцов линейной, решетчатой или кристаллической формы. Для лопаток ГТД, произведенных классическим способом, доказано, что образцы обладали большей прочностью на растяжение при нагрузке в направлении экструзии. После проведения испытаний на одноосное растяжение образцов доказано, что предел растяжения является ключевым параметром энергии, необходимой для межслоевого разрушения. Также было обнаружено, что растягивающие остаточные напряжения и площадь межслоевого контакта существенно влияют на энергию разрушения [17].

Большой разброс механических свойств, который может возникнуть в результате недостаточной подготовки к аддитивному изготовлению детали, указывает на необходимость моделирования с целью прогнозирования механических свойств лопатки ГТД [18]. Для определения механических свойств материала обычно используют несколько методов тестирования. Наиболее распространенные механические испытания включают испытания на одноосное сжатие, сжатие при плоской деформации и одноосное растяжение. Испытание на одноосное растяжение используется наиболее часто и обеспечивает точные значения ключевых механических параметров, таких как модуль Юнга, предел текучести, предел прочности при растяжении, удлинение при разрыве и коэффициент Пуассона. Тем не менее получены выводы, что используемые в настоящее время процедуры оценки механических свойств 3D-печатных объектов с дальнейшим использованием результатов при корректировке программы печати не гарантируют получение изделия с необходимым комплексом параметров, которые нельзя было бы эффективно установить в численном моделировании [19]. Таким образом, становится очевидно, что применение моделирования механических испытаний и свойств 3D-печатных объектов является необходимым условием изготовления качественных деталей. Многочисленные исследования указывают на проблемы, связанные с точным моделированием механических свойств лопаток ГТД, подчеркивая необходимость дополнительных исследований в направлении моделирования.

Трехмерная модель образца может быть построена с использованием любого программного обеспечения, используемого для этих целей, в соответствии с геометрией испытуемого образца (рис. 4). Поскольку образец лопатки ГТД, напечатанный на 3D-принтере, является тонкостенным, для упрощения расчетов, сокращения времени решения задачи и предотвращения потенциальных проблем с сеткой возможно использовать модель средней поверхности [20].



Рис. 4. Образец лопатки ГТД для моделирования
Fig. 4. A sample of a GTE blade for modeling

Сетка криволинейных участков имеет больше узлов, чем стандартизированная сетка программы, она способствует получению высокоточных результатов. Скорость деформации может быть установлена на любом уровне, полученном в ходе практического применения лопаток, например на уровне 3 мм/мин. Необходимо отметить, что наиболее оптимальным в таком случае является установление максимально возможных и неблагоприятных нагрузок [21]. Модель строится таким образом, чтобы растягивающая нагрузка прикладывалась к образцу сверху, а нижняя часть фиксировалась для имитации относительного одноосного движения между верхним и нижним захватами машины для испытания на растяжение [22].

Численный метод с построением сетки и граничными условиями представлен на рис. 5. Модель пластичного материала фон Мизеса может

быть использована для определения нелинейного поведения материала. Модель материала может быть построена с использованием механических и физических свойств и данных кривой напряжения-деформации, взятых из литературных источников [23]. Предел текучести определен на основе деформации смещения и составляет 0,2%.

Зададим геометрические параметры лопатки ГТД, например, лопатки турбины толщиной 2,5, 2 и 3 мм. Эффективная деформация равномерно распределяется на кромке турбинной лопатки с минимальной эффективной деформацией 0,005 и максимальной эффективной деформацией 5,97. Минимальное эффективное напряжение составляет 0,0001 МПа, а максимальное – 0,1436 МПа.

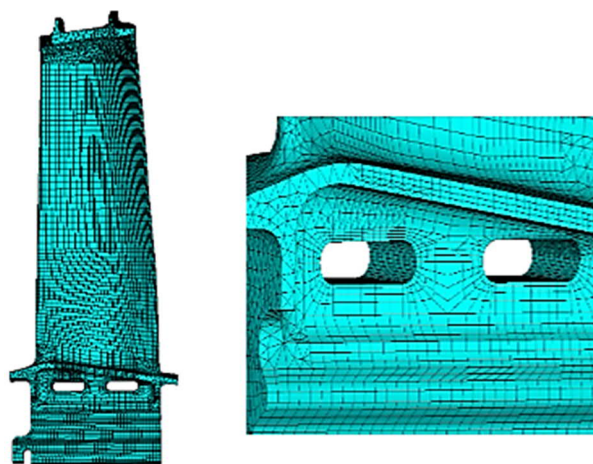


Рис. 5. Моделирование лопатки и создание сетки
Fig. 5. Blade modeling and meshing

Для учета разрушающих деформаций и напряжений может быть применена спектральная характеристика. Сравнение полученных данных на первоначальных этапах должно производиться исключительно с реальными данными до создания полностью независимой системы. Обязательным является моделирование растягивающей нагрузки на образец до точки непосредственно перед разрушением.

Обсуждение полученных результатов

Анализ чувствительности сетки проводится для оценки влияния размера сетки на напряжение по Мизесу и результирующее смещение. Результаты анализа, представленные на рис. 6, показывают, что показатели напряжения и смещения существенно не изменяются в пределах интересующего диапазона элементов сетки, что свидетельствует о надежности изделия.

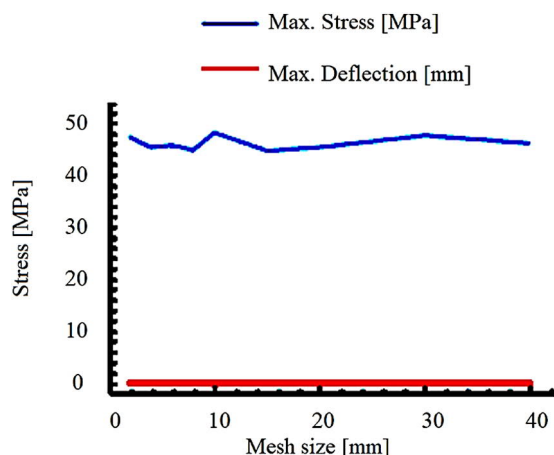


Рис. 6. Максимальное напряжение по Мизесу и максимальное результирующее смещение лопатки ГТД, рассчитанные по сетке

Fig. 6. Maximum von Mises stress and maximum resulting displacement of the GTE blade calculated by the mesh

Из рис. 6 видно, что максимальное напряжение по Мизесу незначительно варьируется в зависимости от результатов испытаний на смещение [24]. Анализ рисунка также позволяет сделать вывод, что качество разбитой сетки приемлемо только для рассматриваемой детали, где ширина детали меньше, чем ее длина. С другой стороны, диаграмма Якоби (рис. 7) показала положительные значения, что свидетельствует о том, что в лопатке, полученной по результатам данного моделирования, искажения или другие нарушения отсутствуют.

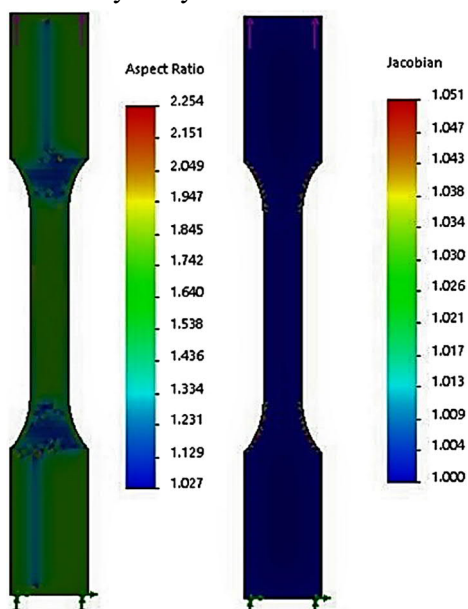


Рис. 7. Контрольные диаграммы сетки, используемые в моделировании: соотношение сторон (слева), якобиан (справа)

Fig. 7. Mesh control diagrams used in modeling: aspect ratio (left), Jacobian (right)

Также можно отметить, что точка максимального напряжения была расположена на средней линии образца в зоне сужения, как показано на рис. 7. Используя данный подход к моделированию, можно спрогнозировать зоны максимального напряжения, которые могут привести к появлению точки возникновения трещины [25].

Кривые «напряжение – деформация», смоделированные методом наименьших квадратов, показаны на рис. 8.

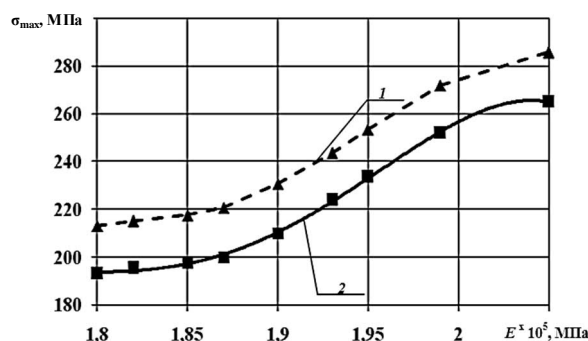


Рис. 8. Зависимость максимальных динамических напряжений в лопатках от модуля Юнга E: 1 – расчетная зависимость; 2 – расчет с использованием ANSYS

Fig. 8. Dependence between maximum dynamic stresses in the blades and Young's modulus E: 1 is calculated dependence; 2 is calculation using ANSYS

Как и ожидалось, кривая одноосного растяжения начинается с упругой зоны, в которой растягивающее напряжение имеет линейную зависимость от приложенной деформации. Линейная зона указывает на диапазон напряжения-деформации, в котором материал восстанавливает свою первоначальную форму после снятия приложенного напряжения или деформации. Линейная зона продолжает выходить за границы предела текучести, по достижении которого в образце происходит пластическая деформация и он не может восстановить первоначальную форму даже после снятия приложенного напряжения / деформации. Зона пластической деформации продолжается до разрыва образца. Предел прочности при растяжении составил 46,18 МПа, а предел текучести, который был оценен с использованием метода смещения 0,2%, составил 15,7 МПа [26].

Как видно из рис. 9, смоделированный и экспериментально полученный профили напряжения-деформации почти перекрывались и демонстрировали одинаковые наклоны и тенденции во всем диапазоне. Значения текучести и предела прочности очень близки друг к другу.

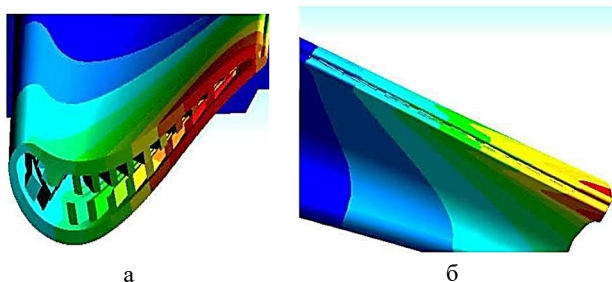


Рис. 9. Профиль напряжения-деформации по статистическим данным (а) и экспериментально полученный профиль напряжения-деформации (б)

Fig. 9. Stress-strain profile according to statistical data (a) and the experimentally obtained stress-strain profile (b)

Значительным преимуществом подобного подхода к моделированию является то, что при его применении ошибка в определении предела текучести составляет ~ 2%, а погрешность предела прочности при растяжении – около 7%. Эти результаты указывают на валидацию модели, полученной указанным способом моделирования.

Выводы

Разработана трехмерная компьютерная модель для печати лопаток газовых турбин на 3D-принтере. Для моделирования проведен расчет среды, основанный на теории вязкого течения в соответствии с уравнением Рейнольдса (RANS). Получено уравнение RANS для всего вычислительного поля. Получена модель распределения теплового поля детали при ее изготовлении с использованием программного комплекса Ansys.

Прогресс температуры для лопаток рассчитывался исходя из двух вариантов исходных данных: в первом варианте за исходную принималась температура самой печатающей головки, во втором варианте – температура проволоки.

Построена модель напряженно-деформационного состояния в синтезируемом изделии с использованием модели средней поверхности. Результаты анализа модели по Мизесу свидетельствуют о надежности изделия. Анализ модели с использованием диаграммы Якоби также показал отсутствие искажений в лопатке, полученной по результатам данного моделирования. Смоделированный и экспериментально полученный профили напряжения-деформации продемонстрировали одинаковые тенденции во всем диапазоне моделирования, что говорит о валидации разработанной модели. Значительным преимуществом подобного подхода к моделиро-

ванию является то, что при его применении ошибка в определении предела текучести составляет ~ 2%, а погрешность предела прочности при растяжении – около 7%. Предлагаемый подход к моделированию позволяет спрогнозировать зоны максимального напряжения, которые могут привести к появлению точки возникновения трещины в изделии.

Список источников

1. Лехов О.С., Михалев А.В., Билалов Д.Х. Исследование совмещенного процесса получения сортовых заготовок на установке непрерывного литья и деформации // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т. 18. №2. С. 56-61. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-2-56-61>
2. Особенности моделирования высокоэффективной многоступенчатой парокompрессионной теплонасосной установки / Антипов Ю.А., Шаталова И.И., Шкарин К.В. и др. // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2021. Т. 22. №4. С. 339-347. DOI: 10.22363/2312-8143-2021-22-4-339-347
3. Мамаев В.К., Виноградов Л.В., Ощепков П.П. Моделирование решетки профилей транспортного газотурбинного двигателя // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2019. Т. 20. №2. С. 140-146. DOI: 10.22363/2312-8143-2019-20-2-140-146
4. Корнилова А.В., Заяр Ч. Определение допустимых параметров дефектов в базовых деталях кузнечно-прессовых машин // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2019. Т. 20. №4. С. 308-315. DOI: 10.22363/2312-8143-2019-20-4-308-315
5. Расчетное определение усилия начала пластической деформации при изгибе пальца шарового наружного рулевого наконечника автомобиля посредством моделирования процесса статических испытаний / Гун И.Г., Вахитов А.Р., Столяров Ф.А., Смирнов А.В., Михайловский И.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т. 19. №2. С. 23-31. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-23-31>
6. Dawoud M., Taha I., and Ebeid S.J. Mechanical behaviour of ABS: An experimental study using FDM and injection moulding techniques // Journal of Manufacturing Processes. 2016, vol. 21, pp. 39-45.
7. Geng L., Wu W., Sun L., Fang D. Damage characterizations and simulation of selective laser melting fabricated 3D re-entrant lattices based on in-situ CT testing and geometric reconstruction // Int J Mech Sci. 2019, vol. 157-158, pp. 231-242.
8. Iñigo Flores Ituarte, Eric Coatanea, Mika Salmi, Jukka Tuomi, Jouni Partanen, Additive manufacturing in production: a study case applying technical requirements // Physics Procedia. 2015, vol. 78, pp. 357-366.

9. Li C., Denlinger E.R., Gouge M.F., Irwin J.E., Michaleris P. Numerical verification of an Octree mesh coarsening strategy for simulating additive manufacturing processes // *Additive Manuf.* 2019, vol. 30, no. 3, pp. 100903.
10. Liu J., Sun L., Xu W., Wang Q., Yu S., Sun J. Current advances and future perspectives of 3D-printing natural-derived biopolymers // *Carbohydr Polym.* 2019, vol. 207, pp. 297-316.
11. Montero M., et al. Material characterization of fused deposition modeling (FDM) ABS by designed experiments // *Society of Manufacturing Engineers*, 2001, vol. 10 (13552540210441166).
12. Pastor-Artigues M.-M., Roure-Fernández F., Ayneto-Gubert X., Bonada-Bo J., Pérez-Guindal E., Buj-Corral I. Elastic Asymmetry of PLA Material in FDM-Printed Parts: Considerations Concerning Experimental Characterisation for Use in Numerical Simulations // *Materials*. 2020, vol. 13, no. 1, p. 15.
13. Quan H., Zhang T., Xu H., Luo S., Nie J., Zhu X. Photo-curing 3D printing technique and its challenges // *Bioactive Materials*. 2020, vol. 5, pp. 110-115.
14. Rodríguez J.F., Thomas J.P., and Renaud J.E. Design of Fused-Deposition ABS Components for Stiffness and Strength // *Journal of Mechanical Design*, 2003, vol. 125, no. 3, pp. 545-551.
15. Sood A.K., Ohdar R.K., and Mahapatra S.S. Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts // *Materials & Design*, 2010, vol. 31, no. 1, pp. 287-295.
16. Seno T., Ohtake Y., Kikuch I.Y., Saito N., Suzuki H., Nagai Y. 3D scanning based mold correction for planar and cylindrical parts in aluminum die casting // *Journal of Computational Design and Engineering*. 2015, vol. 2, no. 2, pp. 96-104.
17. Webb B and Doyle B.J. Parameter optimization for 3D bioprinting of hydrogels // *Bioprinting*. 2017, vol. 8, pp. 8-12.
18. Yao T., Ye J., Deng Z., Zhang K., Ma Y., Ouyang H. Tensile failure strength and separation angle of FDM 3D printing PLA material: experimental and theoretical analyses // *Composites. Part B: Engineering*. 2020, vol. 188, pp. 107894.
19. Zou R., et al. Isotropic and anisotropic elasticity and yielding of 3D printed material // *Composites. Part B: Engineering*, 2016, vol. 99, pp. 506-513.
20. Rodríguez-Panes A., Claver J., Camacho M.A. The influence of manufacturing parameters on the mechanical behaviour of PLA and ABS pieces manufactured by FDM: a comparative analysis, materials // *J Manuf Mater Process*. 2018, vol. 11, p. 64.
21. Petersmann S., Spoerk M., Van De Steene W., Üçal M., Wiener J., Pinter G., Arbeiter F. Mechanical properties of polymeric implant materials produced by extrusion-based additive manufacturing // *J Mech Behav Biomed Mater*. 2020, vol. 104, p. 103611.
22. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen KTQ, Hui D. Additive manufacturing (3D printing): a review of materials, methods, applications and challenges // *Composites. Part B: Engineering*. 2018, vol. 143, pp. 172-196.
23. Murr L.E. Frontiers of 3D Printing/Additive Manufacturing: from Human Organs to Aircraft Fabrication // *Journal of Materials Science & Technology*. 2016, vol. 32, iss. 10, pp. 987-995.
24. Kafara M., Kemnitzer J., Westermann H.H. and Steinhilper R. Influence of Binder Quantity on Dimensional Accuracy and Resilience in 3D-Printing // *Procedia Manufacturing*. 2018, vol. 21, pp. 638-646.
25. Hu Z., Chen F., Xu J., Nian Q., Line D., Chen C., Zhu X., Chen Y. and Zhang M. 3D printing graphene-aluminum nanocomposites // *Journal of Alloys and Compounds*. 2018, vol. 746, pp. 269-276.
26. Melenka, G.W., et al. Evaluation and prediction of the tensile properties of continuous fiber-reinforced 3D printed structures // *Composite Structures*. 2016, vol. 153, pp. 866-875.

References

1. Lekhov O.S., Mikhalev A.V., Bilalov D.Kh. Studies on a combined process of producing billets on a continuous casting and deformation plant. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020;18(2):56-61. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-2-56-61>. (In Russ.)
2. Antipov Yu.A., Shatalova I.I., Shkarin K.V. et al. Features of modeling of a highly efficient multistage vapor compression heat pump unit. *Vestnik Rossiiskogo universiteta družby narodov. Seriya: Inzhenernye issledovaniya* [RUDN Journal of Engineering Research]. 2021;22(4):339-347. DOI: 10.22363/2312-8143-2021-22-4-339-347. (In Russ.)
3. Mamaev V.K., Vinogradov L.V., Oshchepkov P.P. Modeling of the set of blade profiles of a gas turbine engine. *Vestnik Rossiiskogo universiteta družby narodov. Seriya: Inzhenernye issledovaniya* [RUDN Journal of Engineering Research]. 2019;20(2):140-146. DOI: 10.22363/2312-8143-2019-20-2-140-146. (In Russ.)
4. Kornilova A.V., Zaya K. Determination of acceptable parameters of defects in basic parts of forging and pressing machines. *Vestnik Rossiiskogo universiteta družby narodov. Seriya: Inzhenernye issledovaniya* [RUDN Journal of Engineering Research]. 2019;20(4):308-315. DOI: 10.22363/2312-8143-2019-20-4-308-315. (In Russ.)
5. Gun I.G., Vakhitov A.R., Stolyarov F.A., Smirnov A.V., Mikhailovsky I.A. Calculation of starting force of plastic deformation, when bending an outer tie rod ball stud, by the simulation of static tests. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021;19(2):23-31. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-23-31>. (In Russ.)

6. Dawoud M., Taha I., Ebeid S.J. Mechanical behaviour of ABS: An experimental study using FDM and injection moulding techniques. *Journal of Manufacturing Processes*. 2016;21:39-45.
7. Geng L., Wu W., Sun L., Fang D. Damage characterizations and simulation of selective laser melting fabricated 3D reentrant lattices based on in situ CT testing and geometric reconstruction. *Int J Mech Sci*. 2019;157-158:231-242.
8. Iñigo Flores Ituarte, Eric Coatanea, Mika Salmi, Jukka Tuomi, Jouni Partanen. Additive manufacturing in production: a study case applying technical requirements. *Physics Procedia*. 2015;78:357-366.
9. Li C., Denlinger E.R., Gouge M.F., Irwin J.E., Michaleris P. Numerical verification of an Octree mesh coarsening strategy for simulating additive manufacturing processes. *Additive Manuf*. 2019;30(3):100903.
10. Liu J., Sun L., Xu W., Wang Q., Yu S., Sun J. Current advances and future perspectives of 3D printing natural-derived biopolymers. *Carbohydr Polym*. 2019;207:297-316.
11. Montero M. et al. Material characterization of fused deposition modeling (FDM) ABS by designed experiments. *Society of Manufacturing Engineers*. 2001;10 (13552540210441166).
12. Pastor-Artigues M.-M., Roure-Fernández F., Ayneto-Gubert X., Bonada-Bo J., Pérez-Guindal E., Buj-Corral I. Elastic asymmetry of PLA material in FDM-Printed Parts: Considerations concerning experimental characterisation for use in numerical simulations. *Materials*. 2020;13(1):15.
13. Quan H., Zhang T., Xu H., Luo S., Nie J., Zhu X. Photo-curing 3D printing technique and its challenges. *Bioactive Materials*. 2020;5:110-115.
14. Rodríguez J.F., Thomas J.P., Renaud J.E. Design of fused-deposition ABS components for stiffness and strength. *Journal of Mechanical Design*. 2003;125(3):545-551.
15. Sood A.K., Ohdar R.K., Mahapatra S.S. Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts. *Materials & Design*. 2010;31(1):287-295.
16. Seno T., Ohtake Y., Kikuch I.Y., Saito N., Suzuki H., Nagai Y. 3D scanning based mold correction for planar and cylindrical parts in aluminum die casting. *Journal of Computational Design and Engineering*. 2015;2(2):96-104.
17. Webb B., Doyle B.J. Parameter optimization for 3D bioprinting of hydrogels. *Bioprinting*. 2017;8:8-12.
18. Yao T., Ye J., Deng Z., Zhang K., Ma Y., Ouyang H. Tensile failure strength and separation angle of FDM 3D printing PLA material: experimental and theoretical analyses. *Composites. Part B: Engineering*. 2020;188:107894.
19. Zou R. et al. Isotropic and anisotropic elasticity and yielding of 3D printed material. *Composites. Part B: Engineering*. 2016;99:506-513.
20. Rodríguez-Panes A., Claver J., Camacho M.A. The influence of manufacturing parameters on the mechanical behaviour of PLA and ABS pieces manufactured by FDM: a comparative analysis, materials. *J Manuf Mater Process*. 2018;11:64.
21. Petersmann S., Spoerk M., Van De Steene W., Üçal M., Wiener J., Pinter G., Arbeiter F. Mechanical properties of polymeric implant materials produced by extrusion-based additive manufacturing. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2020;104:103611.
22. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen T., Hui D. Additive manufacturing (3D printing): a review of materials, methods, applications and challenges. *Compos B Eng*. 2018;143:172-196.
23. Murr L.E. Frontiers of 3D printing/additive manufacturing: from human organs to aircraft fabrication. *Journal of Materials Science & Technology*. 2016;32(10):987-995.
24. Kafara M., Kemnitzer J., Westermann H.H., Steinhilper R. Influence of binder quantity on dimensional accuracy and resilience in 3D-printing. *Procedia Manufacturing*. 2018;21:638-646.
25. Hu Z., Chen F., Xu J., Nian Q., Line D., Chen C., Zhu X., Chen Y., Zhang M. 3D printing graphene-aluminum nanocomposites. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018;746:269-276.
26. Melenka G.W. et al. Evaluation and prediction of the tensile properties of continuous fiber-reinforced 3D printed structures. *Composite Structures*. 2016;153:866-875.

Поступила 25.10.2022; принята к публикации 15.02.2023; опубликована 27.03.2023
Submitted 25/10/2022; revised 15/02/2023; published 27/03/2023

Ерошенко Владислав Олегович – аспирант кафедры машиностроительных технологий, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия. Email: vladrusty00@yandex.ru. ORCID 0000-0002-3334-7241. SPIN РИНЦ 2029-5428. AuthorID 1167361.

Малькова Марианна Юрьевна – доктор технических наук, профессор, кафедра машиностроительных технологий, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия. Email: malkova-myu@rudn.ru. ORCID 0000-0002-6939-1658. SPIN РИНЦ 2680-1505. AuthorID 613682. Scopus AuthorID 57214744555.

Задиранов Александр Никитич – доктор технических наук, профессор, кафедра процессов горения и экологической безопасности, Учебно-научный комплекс процессов горения и экологической безопасности, Академия государственной противопожарной службы, Москва, Россия. Email: zadiranov@mail.ru. ORCID 0000-0001-7787-8290. SPIN РИНЦ 2873-6465. AuthorID 323875. Scopus Author ID: 57214856655.

Мещеряков Алексей Викторович – кандидат технических наук, доцент, кафедра процессов горения и экологической безопасности, учебно-научный комплекс процессов горения и экологической безопасности, Академия государственной противопожарной службы, Москва, Россия. Email: malviktp@gmail.com. ORCID 0000-0001-6620-8590. SPIN РИНЦ 1044-5995. AuthorID 656289.

Vladislav O. Eroshenko – postgraduate student, Department of Mechanical Engineering Technologies, Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia. Email: vladrusty00@yandex.ru. ORCID 0000-0002-3334-7241. eLIBRARY SPIN code 2029-5428. AuthorID 1167361.

Marianna Yu. Malkova – DrSc (Eng.), Professor, Department of Mechanical Engineering Technologies, Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia. Email: malkova-myu@rudn.ru. ORCID 0000-0002-6939-1658. eLIBRARY SPIN code 2680-1505. AuthorID 613682. Scopus Author ID 57214744555.

Aleksandr N. Zadiranov – DrSc (Eng.), Professor, Department of Combustion Processes and Environmental Safety, Educational and Scientific Complex of Combustion Processes and Environmental Safety, State Fire Fighting Service Academy of EMERCOM of Russia, Moscow, Russia. Email: zadiranov@mail.ru. ORCID 0000-0001-7787-8290. eLIBRARY SPIN code 2873-6465. AuthorID 323875. Scopus Author ID 57214856655.

Aleksey V. Meshcheryakov – PhD (Eng.), Associate Professor, Department of Combustion Processes and Environmental Safety, Educational and Scientific Complex of Combustion Processes and Environmental Safety, State Fire Fighting Service Academy of EMERCOM of Russia, Moscow, Russia. Email: malviktp@gmail.com. ORCID 0000-0001-6620-8590. eLIBRARY SPIN code 1044-5995. AuthorID 656289.

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 691.7
DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-1-93-99



ПРИМЕНЕНИЕ САМОЗАКЛИНИВАЮЩИХСЯ СТРУКТУР: ДЕМОНСТРАЦИЯ КОНЦЕПЦИИ НА ОСНОВЕ КЭ-МОДЕЛИРОВАНИЯ

Константинов Д.В.¹, Матвеев С.В.², Песин А.М.¹, Корчунов А.Г.¹, Пивоварова К.Г.¹

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

² Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Современное развитие техники предъявляет все большие требования к повышению жесткости и надежности функционирования материалов и конструкций. Традиционно это достигается созданием новых химических составов используемых материалов и методов их обработки. В настоящей работе на основе компьютерного конечно-элементного моделирования демонстрируется еще один эффективный метод повышения жесткости и надежности материалов и конструкций за счет подбора рациональной геометрии элементов структуры и условий их взаимодействия друг с другом. Такие структуры были впервые предложены математиками и получили название самозаклинивающихся. Самозаклинивающаяся структура – это набор выпуклых тел, такой, что любое бесконечно малое движение одного из них возможно лишь как часть совместного движения всех тел вместе (как единого твердого тела). Моделирование производилось в программном комплексе Abaqus с целью демонстрации концептуального подхода к использованию самозаклинивающихся структур в области разработки конструктивных материалов различного назначения. На основе результатов моделирования изучены различные паттерны распределения нагрузки в подобных системах, с помощью которых выдвинуты теории о их применении в будущих исследованиях. Было установлено, что в зависимости от различных сценариев нагружения подобные структуры могут рассеивать приложенные точечные нагрузки по всему объему конструкционного элемента. Также продемонстрирован потенциал оптимизации геометрии отдельных элементов самозаклинивающихся структур, позволяющий расширить их эксплуатационные свойства с сохранением ключевых особенностей. Научно обосновано будущее применение подобных структур для перераспределения нагрузок как в конструкционных материалах, так и в широком спектре инструментов.

Ключевые слова: самозаклинивающиеся структуры, жесткость, надежность функционирования, новые материалы, конструкции, конечно-элементное моделирование, перераспределение напряжений

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., Матвеев С.В., Песин А.М., Корчунов А.Г., Пивоварова К.Г., 2023

Для цитирования

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. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-93-99>



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

APPLICATION OF INTERLOCKING STRUCTURES:
FEM-BASED CONCEPT DEMONSTRATIONKonstantinov D.V.¹, Matveev S.V.², Pesin A.M.¹, Korchunov A.G.¹, Pivovarova K.G.¹¹ Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia² Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Modern development of machines demands increased hardness and reliability of materials and structures. Usually, this is done by introducing new chemical compositions of materials and new methods of material treatment. Following the computer finite element modeling, this paper demonstrates another efficient method of increasing hardness and reliability of materials and structures by selecting the reasonable geometry of structure elements and conditions of their interactions. These geometrical structures, first introduced by mathematicians, are called interlocking. An interlocking structure is a set of convex bodies arranged so that any infinitely small movement of one of them is possible only as a part of a simultaneous movement by all bodies (as if they were a single body). Modeling was carried out in the Abaqus software complex to demonstrate a conceptual approach to the use of interlocking structures in the development of structural materials for various purposes. Using the simulation results, the authors have studied various patterns of load distribution in such systems and put forward theories about their application in future studies. It was found that depending on various loading scenarios, such structures can dispel the applied point loads along the entire volume of the structural element. The paper also demonstrates the potential for optimizing the geometry of individual elements of interlocking structures, contributing to expanding their operational properties, while maintaining key features. The authors provide a scientific rationale for applying such structures in future to redistribute loads both in structural materials and in a wide range of tools.

Keywords: interlocking structures, hardness, operational reliability, new materials, structures, finite element modeling, stress redistribution

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., 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, vol. 21, no. 1, pp. 93-99. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-93-99>

Введение

Современное развитие техники предъявляет все большие требования к повышению жесткости и надежности функционирования материалов и конструкций. Традиционно это достигается созданием новых химических составов используемых материалов и разработкой надежных методов их обработки. В настоящей работе предлагается еще один эффективный метод повышения жесткости и надежности материалов и конструкций за счет подбора рациональной геометрии элементов структуры и условий их взаимодействия друг с другом. Такие структуры были впервые предложены математиками и получили название самозаклинивающихся.

Самозаклинивающаяся структура – это набор выпуклых тел, такой, что любое бесконечно малое движение одного из них возможно лишь как часть совместного движения всех тел вместе (как единого твердого тела). Имеющиеся структуры базируются на рассмотрении слоев из кубов, тетраэ-

ров и октаэдров и других объемных тел. История открытия самозаклинивающихся структур, а также их примеры и приложения широко опубликованы в работах [1-3]. Данная тема получила известность как в области чистой 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]. Данные структуры обладают главной 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, машиностроения, строительстве. Начиная с 2019 года, в Магнитогорском государ-

ственном 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 [9-15].

Материалы и методы исследования

Для представляемого исследования была разработана компьютерная модель самозаклинивающейся структуры, состоящей из кубических элементов (рис. 1).

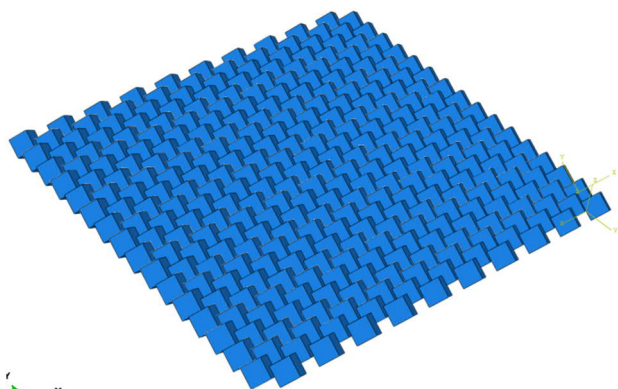


Рис. 1. Общий вид конечно-элементной модели
Fig. 1. General view of the FEM model

Кубические элементы располагались в пространстве таким образом, чтобы сечения каждого куба, в которых образуется правильный шестиугольник, лежали в одной плоскости, а сами кубы соприкасались. Также, согласно граничным условиям, боковые ребра крайних кубов жестко фиксировались в пространстве с целью стабилизации всей структуры. Между поверхностями кубов использовался контакт типа General Contact. Модель засеивалась кубическими элементами (общее количество элементов – 69 120). В качестве материала была выбрана сталь марки 80, при этом это не имело принципиального значения с позиции исследования, так как главной целью была именно демонстрация эффектов перераспределения напряжений при различных шаблонах нагружения.

Для исследования напряженного состояния в вершине кубов давалась концентрированная си-

ла, направленная строго перпендикулярно плоскости, в которой находились шестигранные сечения всех кубов.

Полученные результаты и их обсуждение

В работе исследовались различные сценарии нагружения смоделированной структуры. Для каждого случая представлены три момента нагружения с целью продемонстрировать динамику распределения напряжений в структуре.

При осуществлении давления на вершину центрального куба начинается процесс распределения напряжений во всех близлежащих компонентах структуры (рис. 2). Далее в ходе роста давления начинает формироваться ярковыраженная направленность распределения нагрузки в стороны углов структуры. При этом примечательно, что в указанных направлениях уровень напряжения Мизеса в каждом последующем кубе снижается в абсолютных величинах примерно на 10-15%, а условные направления на 4, 8 и 12 часов остаются практически незадействованы.

При увеличении количества точек нагружения до двух (рис. 3) патерн рассеивания нагрузки изменяется. Высокие напряжения получают в своих вершинах кубы, которые находятся на пересечении «рассеивающих» направлений каждого из нагружаемых элементов. Стоит отметить, что особенно ярко данный факт наблюдается в области между нагружаемыми кубами.

При несколько измененной задаче с раздвинутыми точками нагружения самозаклинивающейся структуры (рис. 4) ранее описанный эффект наблюдается менее выражено. Напряжения Мизеса в данном случае рассеиваются по структуре более равномерно.

В случае дальнейшего увеличения числа точек нагружения (рис. 5) упомянутый во второй модели тренд демонстрируется более наглядно. Кубы, находящиеся внутри периметра, очерченного нагруженными элементами, испытывают максимальные значения напряжений, которые в определенный момент практически сравниваются по абсолютным значениям с нагружаемыми.

Увеличение точек приложения давления до девяти (рис. 6) наглядно показало, что элементы структуры, находящиеся в ее углах, практически не распределяют нагрузку на соседние кубы. Более того, концентрирование всех девяти нагружаемых элементов вблизи друг относительно друга в симуляции приводит к нарушению целостности структуры в целом.

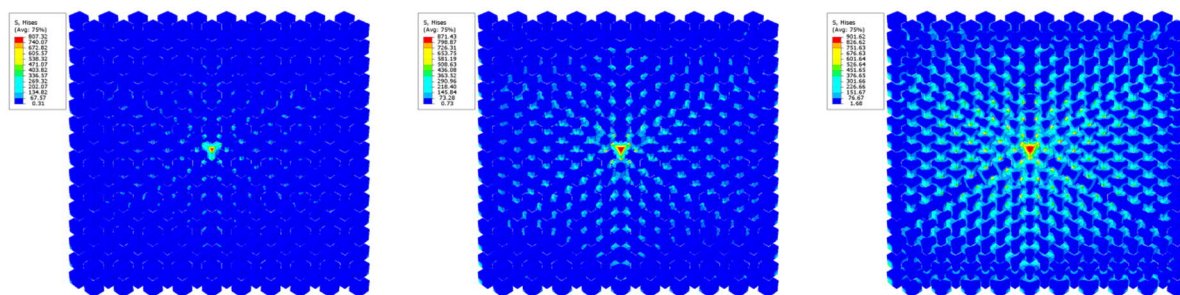


Рис. 2. Динамика перераспределения напряжений Мизеса в самозаклинивающейся структуре при нагружении в единственной центральной точке

Fig. 2. Dynamics of the von Mises stress redistribution in the interlocking structure, when loading in one central point

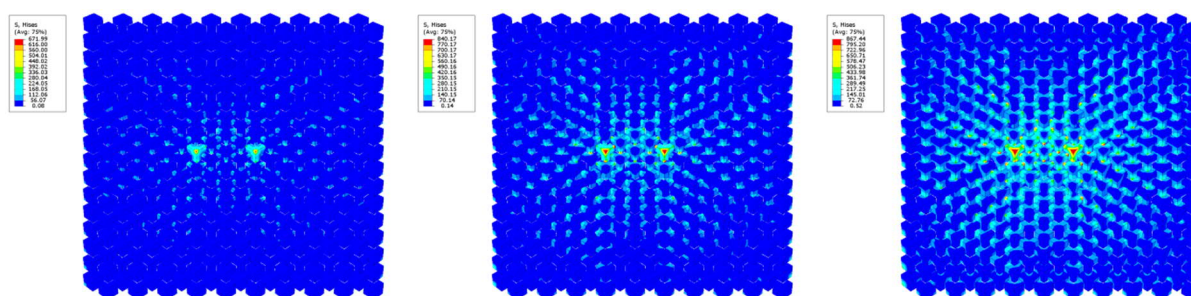


Рис. 3. Динамика перераспределения напряжений Мизеса в самозаклинивающейся структуре при нагружении в двух соседствующих точках

Fig. 3. Dynamics of the von Mises stress redistribution in the interlocking structure, when loading in two neighboring points

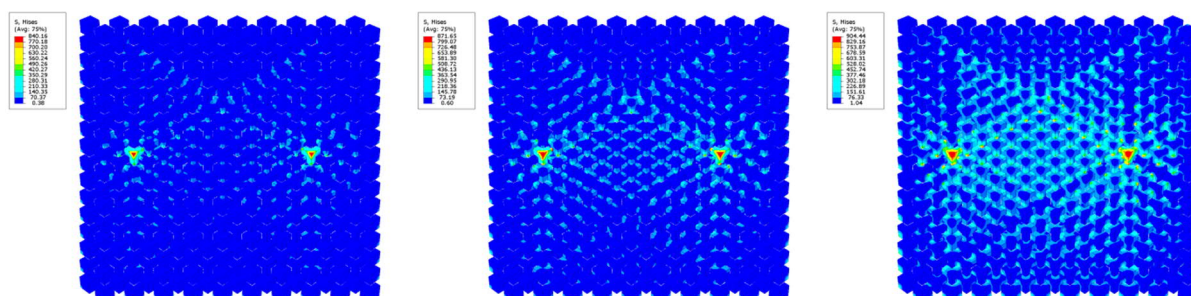


Рис. 4. Динамика перераспределения напряжений Мизеса в самозаклинивающейся структуре при нагружении в двух удаленных точках

Fig. 4. Dynamics of the von Mises stress redistribution in the interlocking structure, when loading in two remote points

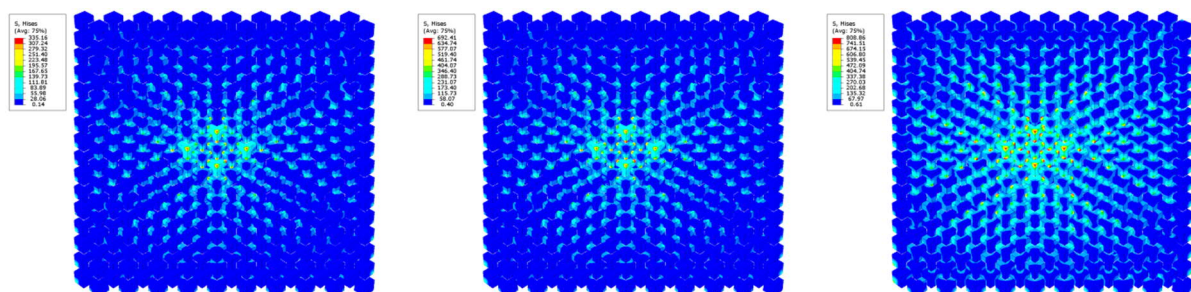


Рис. 5. Динамика перераспределения напряжений Мизеса в самозаклинивающейся структуре при нагружении в четырех соседствующих точках

Fig. 5. Dynamics of the von Mises stress redistribution in the interlocking structure, when loading in four neighboring points

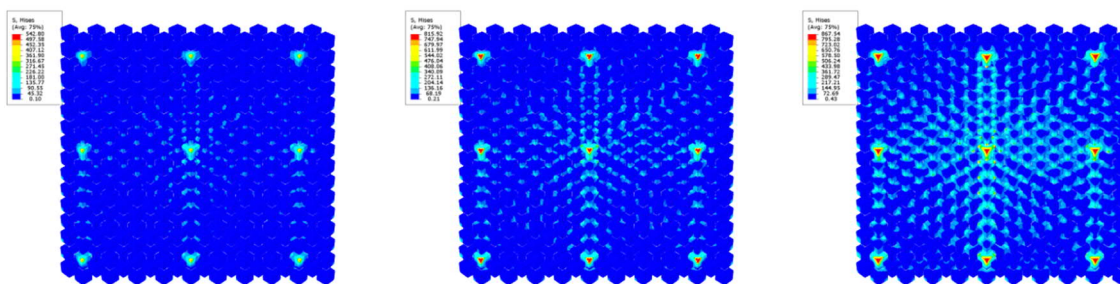


Рис. 6. Динамика перераспределения напряжений Мизеса в самозаклинивающейся структуре при нагружении в девяти равноудаленных точках

Fig. 6. Dynamics of the von Mises stress redistribution in the interlocking structure, when loading in nine equally spaced points

Отдельно стоит отметить, применимость данных эффектов для производства не только строительных материалов (в том числе для сложно прогнозируемых условий эксплуатации), но различного рода технологического инструмента. Например, исследованная в статье структура в вариации с усеченной поверхностью (рис. 7) может быть применена в области производства различного рода сэндвич-панелей с целью перераспределения локальных нагрузок по большой площади конструктивного элемента. Также дополнительно следует исследовать вопрос многослойной работы подобных структур.

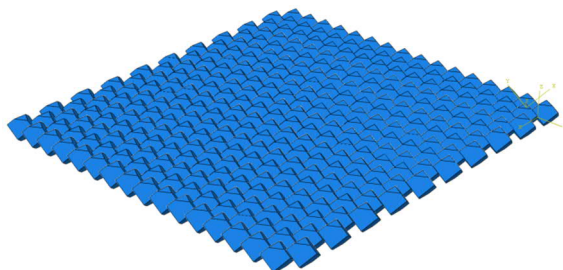


Рис. 7. Вариация самозаклинивающейся структуры для использования в сэндвич-панелях

Fig. 7. The interlocking structure used in sandwich panels (for reference)

С целью получения своего рода фильтрующих свойств также может быть применена вариация структуры с оптимизированной топологией куба (рис. 8).

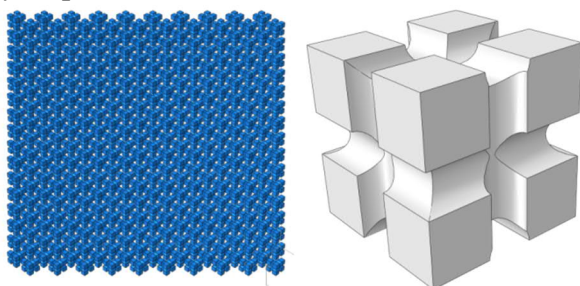


Рис. 8. Вариация самозаклинивающейся структуры для использования в геотекстиле

Fig. 8. The interlocking structure used in geotextile (for reference)

Подобная вариация может успешно использоваться в различного рода геобарьерах для одновременного перераспределения нагрузки и отфильтровывания, например, вод.

Заключение

На основе компьютерного моделирования продемонстрирован широкий потенциал самозаклинивающихся структур в области перераспределения разгрузок, что имеет важное значение для отраслей ответственного строительства, автомобиле- и машиностроения. В целом полученные результаты служат заделом для дальнейшего прикладного использования самозаклинивающихся структур в строительной отрасли и исследования их возможностей и ограничений.

Список источников

1. Dyskin A.V., Estrin Y., Kanel-Belov A.J. and Pasternak E. Toughening by fragmentation – how topology helps // Advanced Engineering Mater. 2001, vol. 3, pp. 885-888.
2. Dyskin A.V., Estrin Y., Kanel-Belov A.J. and Pasternak E. Topological interlocking of platonic solids: A way to new materials and structures // Phil. Mag. Lett. 2003, vol. 83, pp. 197-203.
3. Dyskin A.V., Estrin Y., Pasternak E., Khor H.C. and Kanel-Belov A.J. Fracture resistant structures based on topological interlocking with nonplanar contacts // 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. 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, vol. 57, no. 1, pp. 10-21.
6. Estrin Y., Dyskin A.V., Pasternak E., Khor H.C. and Kanel-Belov A.J. Topological interlocking of protective tiles for Space Shuttle // Phil. Mag. Letters. 2003, vol. 83, pp. 351-355.
7. Dyskin A.V., Estrin Y., Kanel-Belov A.J. and Pasternak E. Interlocking properties of buckyballs // Physics Letters A. 2003, vol. 319, pp. 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, vol. 7, no. 1, 11844. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-12147-3>
9. Заявка № 2021126274 РФ. 07.09.2021. Стыковое соединение железобетонного перекрытия с колонной / Кришан А.Л., Песин А.М., Белов А.Я., Пастернак Е., Локотунина Н.М., Сагадатов А.И.
10. Пат. 2756086 РФ. МПК В32В7/02. Способ получения слоистого биметалла сталь-алюминиевый сплав / Песин А.М., Белов А.Я., Дискин А.В., Тулупов О.Н., Пустовойтов Д.О., Локотунина Н.М., Бирюкова О.Д.; патентообладатель Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. № 2021103956, заявл. 16.02.2021; опубл. 27.01.2021. Бюл. № 27.
11. Заявка на изобретение № 2021101410, 22.01.2021. Способ получения слоистого проката / Песин А.М., Белов А.Я., Пастернак Е., Белов В.К., Пустовойтов Д.О., Локотунина Н.М., Бирюкова О.Д., Кожмякина А.Е.
12. Заявка на изобретение № 2021106748, 15.03.2021. Способ производства биметаллической проволоки / Песин А.М., Харитонов В.А., Белов А.Я., Пастернак Е., Тулупов О.Н., Пустовойтов Д.О., Локотунина Н.М.
13. Заявка на изобретение № 2021110188, 12.04.2021. Волока / Песин А.М., Харитонов В.А., Тулупов О.Н., Белов А.Я., Дискин А.В., Пустовойтов Д.О., Локотунина Н.М.
14. Заявка на изобретение № 2021110189, 12.04.2021. Составная волока / Песин А.М., Харитонов В.А., Корчунов А.Г., Белов А.Я., Пастернак Е., Пустовойтов Д.О., Пивоварова К.Г. Решение о выдаче патента от 06.10.2021 г.
15. Заявка на изобретение № 2021113061, 04.05.2021. Роликовая волока / Песин А. М., Харитонов В.А., Белов А. Я., Дискин А.В., Барышников М.П., Пустовойтов Д.О., Извеков Ю.А., Носов Л.В., Песин И.А.
- on topological interlocking with nonplanar contacts. *Advanced Engineering Mater.* 2003;5(3):116-119.
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. Krishan A.L., Pesin A.M., Belov A.Ya., Pasternak E., Lokotunina N.M., Sagadotov A.I. A butt joint of the reinforced concrete floor and the column. RU2021126274 (Application) 2021.
10. Pesin A.M., Belov A.Ya., Diskin A.V., Tulupov O.N., Pustovoytov D.O., Lokotunina N.M., Biryukova O.D. Method of producing the bimetallic layered steel-aluminum alloy composites. RU2756086 (Patent) 2021.
11. Pesin A.M., Belov A.Ya., Pasternak E., Belov V.K., Pustovoytov D.O., Lokotunina N.M., Biryukova O.D., Kozhemyakina A.E. Method of producing layered rolled products. RU2021101410 (Application for an invention) 2021.
12. Pesin A.M., Kharitonov V.A., Belov A.Ya., Pasternak E., Tulupov O.N., Pustovoytov D.O., Lokotunina N.M. Method of producing bimetallic wire. RU2021106748 (Application for an invention) 2021.
13. Pesin A.M., Kharitonov V.A., Tulupov O.N., Belov A.Ya., Diskin A.V., Pustovoytov D.O., Lokotunina N.M. Drawing die. RU2021110188 (Application for an invention) 2021.
14. Pesin A.M., Kharitonov V.A., Korchunov A.G., Belov A.Ya., Pasternak E., Pustovoytov D.O., Pivovarov K.G. Split die. RU2021110189 (Application for an invention) 2021.
15. Pesin A.M., Kharitonov V.A., Belov A.Ya., Diskin A.V., Baryshnikov M.P., Pustovoytov D.O., Izvekov Yu.A., Nosov L.V., Pesin I.A. Roller die. RU2021113061 (Application for an invention) 2021.

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

Поступила 12.12.2022; принята к публикации 06.03.2023; опубликована 27.03.2023
Submitted 12/12/2022; revised 06/03/2023; published 27/03/2023

Константинов Дмитрий Вячеславович – кандидат технических наук, специалист управления по международной деятельности, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: const_dimon@mail.ru. ORCID 0000-0003-3979-9940

Матвеев Сергей Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия.

Песин Александр Моисеевич – доктор технических наук, профессор, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. ORCID 0000-0002-5443-423X

Корчунов Алексей Георгиевич – доктор технических наук, профессор, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. ORCID 0000-0002-2844-8283

Пивоварова Ксения Григорьевна – доктор технических наук, доцент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.

Dmitrii V. Konstantinov – PhD (Eng.), Specialist of the International Office, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: const_dimon@mail.ru. ORCID 0000-0003-3979-9940

Sergei V. Matveev – DrSc (Physics and Mathematics), Professor, Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia.

Aleksandr M. Pesin – DrSc (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. ORCID 0000-0002-5443-423X

Aleksey G. Korchunov – DrSc (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. ORCID 0000-0002-2844-8283

Kseniya G. Pivovarova – DrSc (Eng.), Associate Professor, Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

NEW TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.527
DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-1-100-108



ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ЗАПОРНОГО УСТРОЙСТВА ЭЖЕКЦИОННОГО ТИПА ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ВЫХЛОПА АГРЕССИВНЫХ ГАЗОВ

Спиридонов Е.К., Исмагилов А.Р., Хабарова Д.Ф.

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Челябинская область изобилует промышленными предприятиями, на которых используются различные теплообменные аппараты – реакторы, входящие в состав фьюминг-печей, конвертеров, печей для выплавки стали погружным факелом, барботажных колонн, аппаратов гетерогенного катализа и химического синтеза и др. В таких аппаратах протекают химические реакции под давлением при высоких температурах, сопровождающиеся фазовыми переходами. Продукты реакции в них составляют существенную долю вредных выхлопов в окружающую среду во время загрузки сыпучего материала во внутреннюю полость реактора. При загрузке запорное механическое устройство открыто. Химические реакции протекают под давлением выше атмосферного, что приводит к выхлопу агрессивных газов через загрузочное отверстие. Вместе с тем работа механических запорных устройств сопровождается частыми выходами из строя. В качестве альтернативы механическому запорному устройству предлагается установка пневматического запорного устройства эжекционного типа, не содержащего подвижных механических частей. Предотвращение выброса вредных газов осуществляется противоточной высокоскоростной струей воздуха, истекающей из сопла запорного устройства в загрузочную трубу, являющуюся смесительной камерой эжектора. Это существенно снижает загрязнение окружающей среды. Вместе с тем нагнетание в реактор через эжекторное устройство дополнительного количества воздуха интенсифицирует химические процессы в реакторе. В пневматическом запорном устройстве протекает сложный газодинамический процесс смешения активного и пассивного потоков газа или смеси. На сегодняшний день отсутствует теория расчета пневматических запорных аппаратов эжекционного типа. В данной статье предложены математическая модель рабочего процесса и методика расчета и проектирования пневматического запорного устройства эжекционного типа, позволяющая разрабатывать пневматические затворы с минимальным потребным расходом воздуха.

Ключевые слова: выхлоп, агрессивные газы, запорное устройство, эжектор, пневматический затвор, математическая модель, характеристики, методика расчета

Работа поддержана грантом РНФ 22-29-20084.

© **Спиридонов Е.К.,** Исмагилов А.Р., Хабарова Д.Ф., 2023

Для цитирования

Спиридонов Е.К., Исмагилов А.Р., Хабарова Д.Ф. Исследование и разработка пневматического запорного устройства эжекционного типа для предотвращения выхлопа агрессивных газов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №1. С. 100-108. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-100-108>



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

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF A PNEUMATIC SHUT-OFF DEVICE OF AN EJECTION TYPE TO PREVENT THE EXHAUST OF HAZARDOUS GASES

Spiridonov E.K., Ismagilov A.R., Khabarova D.F.

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The Chelyabinsk Region is home to many industrial companies, applying various heat and mass transfer facilities, namely reactors of fuming furnaces, basic oxygen furnaces, bubble columns, heterogeneous catalysis and chemical synthesis facilities, etc. The said facilities operate with chemical reactions at pressure and high temperatures accompanied by phase transitions. The products of these reactions make up a significant share of hazardous environmental emissions during the charging of bulk material into the internal chamber of the reactor. A mechanical shut-off device is open when charging. The chemical reactions take place at excessive pressure, which leads to the exhaust of hazardous gases through the charging opening. At the same time, the operation of mechanical shut-off devices is associated with relatively frequent failures. The paper presents a pneumatic ejection-type shut-off device that does not contain moving mechanical parts as an alternative to a mechanical shut-off device. Hazardous emissions are prevented by a countercurrent high-speed air jet from the nozzle of the shut-off device into the charging tube, which is also a mixing chamber of the ejector. This significantly reduces environmental pollution. Moreover, injection of additional air into the reactor through the ejector device intensifies the chemical processes in the reactor. A complex gas-dynamic process of mixing active and passive gas or mixture flows takes place in such pneumatic shut-off device. There is no available theory for calculating ejection-type pneumatic shut-off devices. This paper presents a mathematical model of the operating process and a calculation method for designing an ejection-type pneumatic shut-off device, which allows developing pneumatic gates with minimum required air consumption.

Keywords: exhaust, hazardous gases, shut-off device, ejector, pneumatic gates, mathematical model, characteristics, calculation method

The research was funded by the grant from the Russian Science Foundation, No. 22-29-20084.

For citation

Spiridonov E.K., Ismagilov A.R., Khabarova D.F. Research and Development of a Pneumatic Shut-Off Device of an Ejection Type to Prevent the Exhaust of Hazardous Gases. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 1, pp. 100-108. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-100-108>

Введение

Многие технологические процессы на промышленных предприятиях Челябинской области (металлургическая, химическая промышленности и смежные отрасли) сопровождаются выхлопами агрессивных газов, ухудшающих экологическую обстановку окружающей среды. Рассматриваемые технологические процессы сопровождаются загрузкой сыпучего материала во внутреннюю полость реактора (рис. 1). При загрузке запорное механическое устройство открыто. Химические реакции протекают под давлением выше атмосферного, что приводит к выхлопу агрессивных газов через загрузочное устройство. Вместе с тем работа механических запорных устройств сопровождается частыми выходами из строя [1].

Эжектор является динамической гидромашиной трения, работающей, как правило, в непрерывном режиме [2-5]. Данный аппарат не со-

держит подвижных частей, а значит, его конструкция является высоконадёжной [6-9]. Установка пневматического запорного устройства эжекторного типа (рис. 2) предотвратит выхлоп агрессивных газов противотоком газа или смеси газов под давлением, равным или превышающим давление в реакторе.

Расчётная модель пневматического запорного устройства

Процесс загрузки реактора сыпучим материалом сопровождается повышенным противодавлением p_5 . В реакторе происходят непрерывные химические процессы с выделением продуктов сгорания в твёрдой и газовой фазовых состояниях. Далее продукты сгорания покидают аппарат через верхний канал (см. рис. 1). При загрузке материала эжектирование обновлённого газа прекращается и дальнейшее перемещение сыпучего материала осуществляется под действием

силы тяжести в направлении увеличения давления (осевой градиент давления является положительным). Таким образом, расчёт аппарата рассматривается при максимальном перепаде давлений между полостью реактора и входом в пневматическое запорное устройство.

На сегодняшний день недостаточно изучены явления обратных токов в струйных течениях с положительным осевым градиентом давления и

отсутствует законченная теория расчета пневматических аппаратов эжекционного типа.

Для расчета пневматического запорного устройства эжекционного типа применена схема газового эжектора со сверхзвуковым соплом (см. **рис. 2**) [10, 11]. Его работа сопровождается сложным гидромеханическим процессом энергообмена активной и пассивной среды при их смешении в проточной части аппарата.

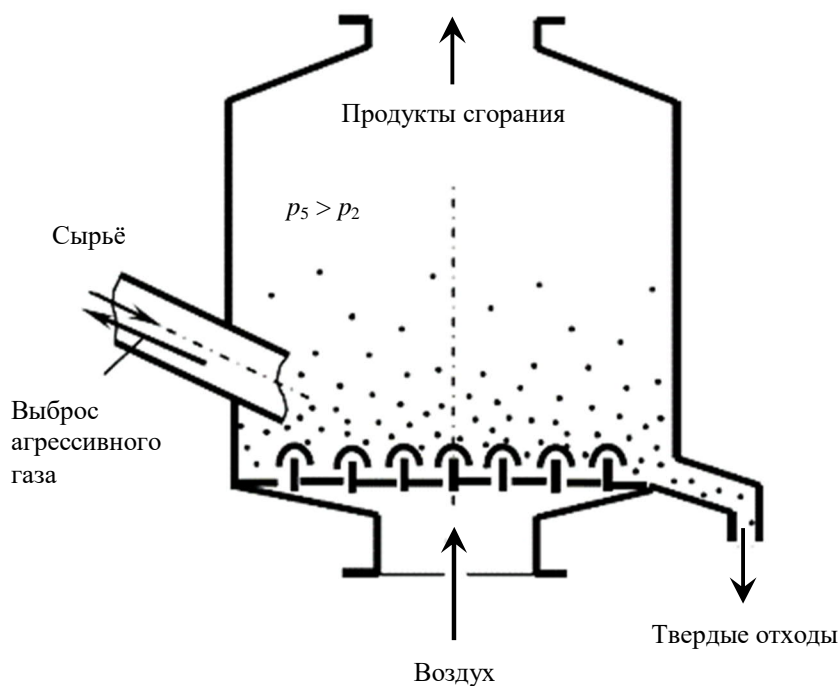


Рис. 1. Реактор с противодавлением
Fig. 1. A back-pressure reactor

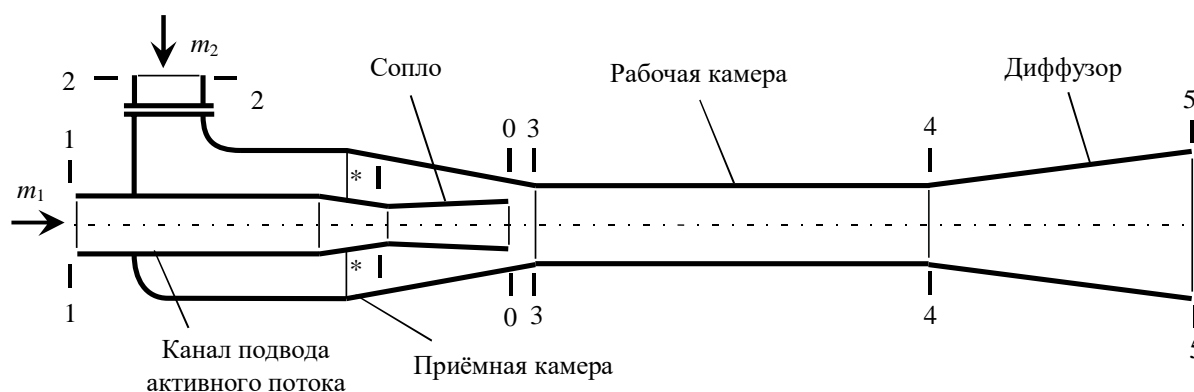


Рис. 2. Расчетная схема пневматического запорного устройства эжекционного типа
Fig. 2. Calculation diagram of an ejection-type pneumatic shut-off device

Физико-математическая модель

Разработана физико-математическая модель на основе уравнений состояния, сохранения массы, количества движения и энергии в канале загрузки, рабочей камере и канале выхлопа:

$$\frac{p_5 - p_2}{p_2} = k \cdot \Pi_{кр} \cdot \frac{d_{кр}^2}{d_3^2} \cdot \frac{p_1}{p_2} \times \left[\psi \cdot \lambda_0 - \varepsilon_{кр} \cdot (\varphi - 0,5) \cdot \frac{d_{кр}^2}{d_3^2} \cdot \frac{v_5}{v_1} \right]; \quad (1)$$

$$\frac{m_1}{S_3} = \frac{k \cdot \Pi_{кр}}{u_{кр}} \cdot \frac{d_{кр}^2}{d_3^2} \cdot p_1, \quad (2)$$

где p_i – давление потоков в i -м сечении; k – постоянная адиабаты (для воздуха $k = 1,4$); $\Pi_{кр}$ и $\varepsilon_{кр}$ – газодинамические функции (для воздуха $\Pi_{кр} = 0,528$; $\varepsilon_{кр} = 0,634$); $d_{кр}$, d_3 – диаметры сечения горловины соплового устройства и загрузочного трубопровода; $\psi = 0,831$; $\varphi = 1,143$ – безразмерные параметры, учитывающие потери удельной энергии потока в проточной части запорного устройства. Соответствуют внутреннему профилю элементов проточной части, обтекание которых средой происходит с минимальными потерями энергии; $\lambda_0 = u_0 / u_{кр}$ – приведенная скорость потока в выходном сечении сопла, равная соотношению скорости потока к критической скорости; $v_i = 1 / \rho_i$ – удельный объем газа в i -м сечении; m_1 – массовый расход активного потока; S_3 – площадь сечения рабочей камеры; $u_{кр}$ – критическая скорость газового потока,

$$u_{кр} = \sqrt{\frac{2 \cdot k \cdot R \cdot T_1}{k + 1}}; \quad (3)$$

R – газовая постоянная (для воздуха $R = 287$ Дж/(кг·К)).

Решая систему уравнений (1)-(3), рассматривая модель совершенного газа, получаем

$$0,615 \cdot \frac{d_{кр}^2}{d_3^2} \cdot \lambda_0 \cdot \frac{p_1}{p_2} - 0,344 \times \frac{d_{кр}^2}{d_3^2} \cdot \frac{p_1^2}{p_2 \cdot p_5} \cdot \frac{T_5}{T_1} - \frac{p_5 - p_2}{p_2} = 0; \quad (4)$$

$$m_1 = 0,01 \cdot \frac{\pi \cdot d_{кр}^2 \cdot p_1}{\sqrt{T_1}}. \quad (5)$$

Полученные выражения позволили установить взаимосвязь между ключевыми режимными и геометрическими параметрами:

- давлением питания p_1 ;
- массовым расходом активного потока газа m_1 ;
- давлением в реакторе p_5 ;
- давлением в приёмной камере p_2 ;
- абсолютными температурами активного потока T_1 и среды в реакторе T_5 ;
- соотношением площадей сечения горловины соплового устройства $S_{кр}$ и загрузочного трубопровода S_3 :

$$\frac{S_{кр}}{S_3} = \frac{d_{кр}^2}{d_3^2}. \quad (6)$$

Полученные результаты и их обсуждение

На графике **рис. 3** представлены результаты расчётов, показывающие влияние увеличения температуры активного потока T_1 , поступающего в реактор, на его массовый расход m_1 при различных диаметрах горловины соплового устройства: $d_{кр} = 60; 65; 70; 75; 80$ мм. Рассматривалось устройство с диаметром камеры смешения $d_3 = 300$ мм, работающим в следующих условиях: абсолютное давление в приёмной камере (загрузочная ёмкость) $p_2 = 100$ кПа, противодавление в выходном сечении запорного устройства (внутренняя полость реактора) $p_5 = 115$ кПа. Принимая во внимание, что осуществляется рекуперация тепловой энергии путём направления её с реактора на вход запорного устройства, температуры активного потока T_1 и в реакторе T_5 равны.

Из графика на **рис. 3** видно, что увеличение температуры активного потока газа T_1 уменьшает его массовый расход m_1 и энергозатраты на работу пневматического затвора эжекционного типа. Установка устройства в реакторе позволит использовать тепловую энергию, так как рабочие процессы в нём протекают при повышенных температурах, достигающих 1000°C и выше [1]. Более того, через пневматическое запорное устройство эжекционного типа возможен подвод нового воздуха, в котором содержащийся кислород ускорит химические реакции в печи.

Предлагаемая конструкция представлена на **рис. 4**. Здесь подвод нагретого газа осуществляется из полости, сопряженной с реактором, через зазор в форме кольца в поперечном сечении.

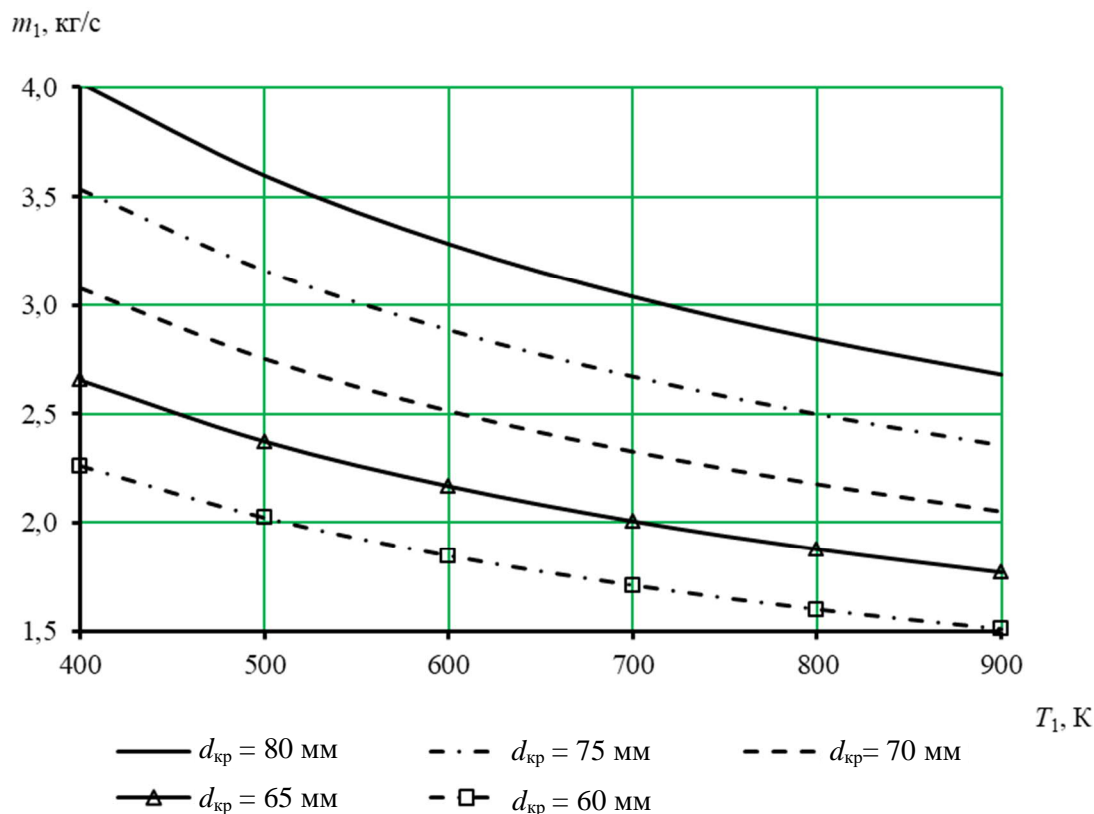


Рис. 3. Влияние температуры и диаметра горловины соплового устройства на массовый расход при условиях $p_1 = 400$ кПа, $p_2 = 100$ кПа, $p_5 = 115$ кПа, $d_3 = 300$ мм

Fig. 3. Influence of temperature and nozzle throat diameter on mass flow at $p_1 = 400$ kPa, $p_2 = 100$ kPa, $p_5 = 115$ kPa, $d_3 = 300$ mm

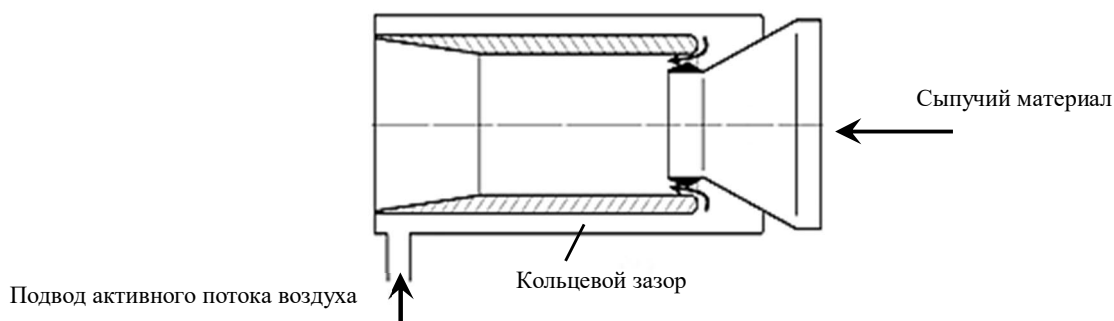


Рис. 4. Конструкция пневматического запорного устройства эжекционного типа

Fig. 4. Design of an ejection-type pneumatic shut-off device

Для получения результатов, которые могут быть использованы в качестве универсальных рекомендаций при проектировании устройства рассмотрим характеристику с соотношениями одноимённых величин (рис. 5): степень расширения потока p_1/p_2 , степень сжатия газа p_5/p_2 , соотношение температур в реакторе и во входном канале T_5/T_1 . Данные соотношения физических параметров сопоставлены с соотношением площадей сечения горловины соплового устройства и загрузочного трубопровода $S_{кр}/S_3$.

График на рис. 5 показывает взаимосвязь между геометрическими и физическими параметрами, а именно между соотношением площадей сечения горловины соплового устройства и загрузочного трубопровода $S_{кр}/S_3$ и степени расширения потока p_1/p_2 при нескольких значениях степени сжатия газа p_5/p_2 , равных 1,05; 1,10; 1,15; 1,20. Расчёты проводились для воздуха ($k = 1,4$; $R = 287$ Дж/(кг·К)) при равных температурах активного потока газа T_1 и среды в реакторе T_5 , то есть соотношении $T_5/T_1 = 1$.

На графике (см. **рис. 5**) видно, что кривые являются убывающими, то есть с увеличением степени расширения потока p_1/p_2 потребное соотношение площадей $S_{кр}/S_3$ уменьшается. При увеличении степени сжатия газа p_5/p_2 кривые располагаются выше, то есть при постоянных входных затратах энергии на формирование активного газового потока ($T_1 = \text{const}$, $p_1 = \text{const}$) и увеличении противодавления p_5 потребный диаметр горловины соплового устройства $d_{кр}$ увеличивается.

Для нескольких соотношений температуры активного потока газа и среды в реакторе $T_5/T_1 = 1; 2; 3$ на **рис. 6** представлены характеристики, выражающие зависимость соотношения площадей проходных сечений соплового устройства и загрузочной трубы $S_{кр}/S_3$ от степе-

ни расширения потока p_1/p_2 . Семейства кривых изображены для степеней сжатия газа $p_5/p_2 = 1,1; 1,2$. Видно, что с увеличением соотношения T_5/T_1 кривая располагается выше, то есть потребная площадь горловины соплового устройства увеличивается. Как было показано на **рис. 3**, уменьшение температуры активного потока T_1 приводит к увеличению его потребного расхода m_1 . Увеличенному потребному расходу активного потока m_1 , в свою очередь, соответствует увеличенная пропускная способность соплового устройства путём увеличения диаметра горловины $d_{кр}$. Для одного и того же устройства ($S_{кр}/S_3 = \text{const}$) при увеличении температуры T_5 в реакторе потребуются увеличение давления питания активного потока газа p_1 .

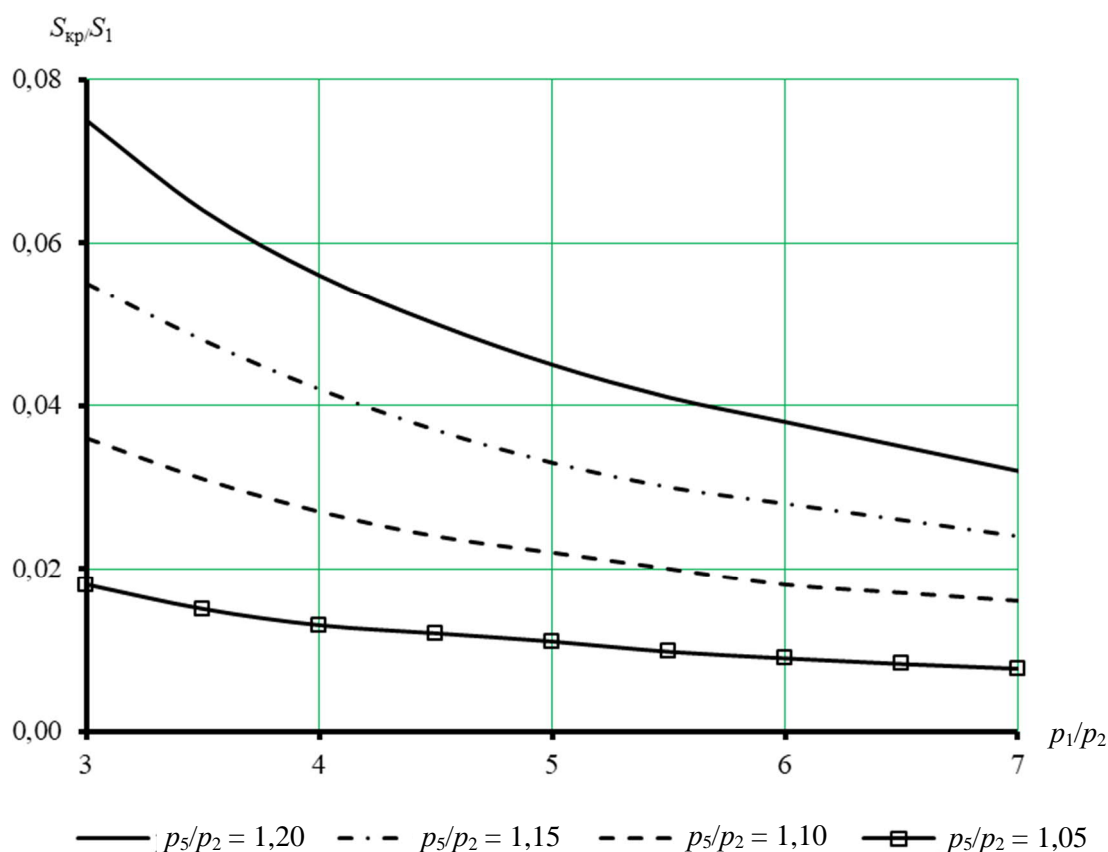


Рис. 5. Зависимость площадей сечения горловины соплового устройства и загрузочного трубопровода от степени расширения струи активного потока при условиях $T_5 = T_1$, $k = 1,4$, $R = 287$ кДж/(кг·К)

Fig. 5. Dependence between the nozzle throat and charging tube cross-section areas and the active flow jet expansion ratio at $T_5 = T_1$, $k = 1,4$, $R = 287$ kJ/(kg·K)

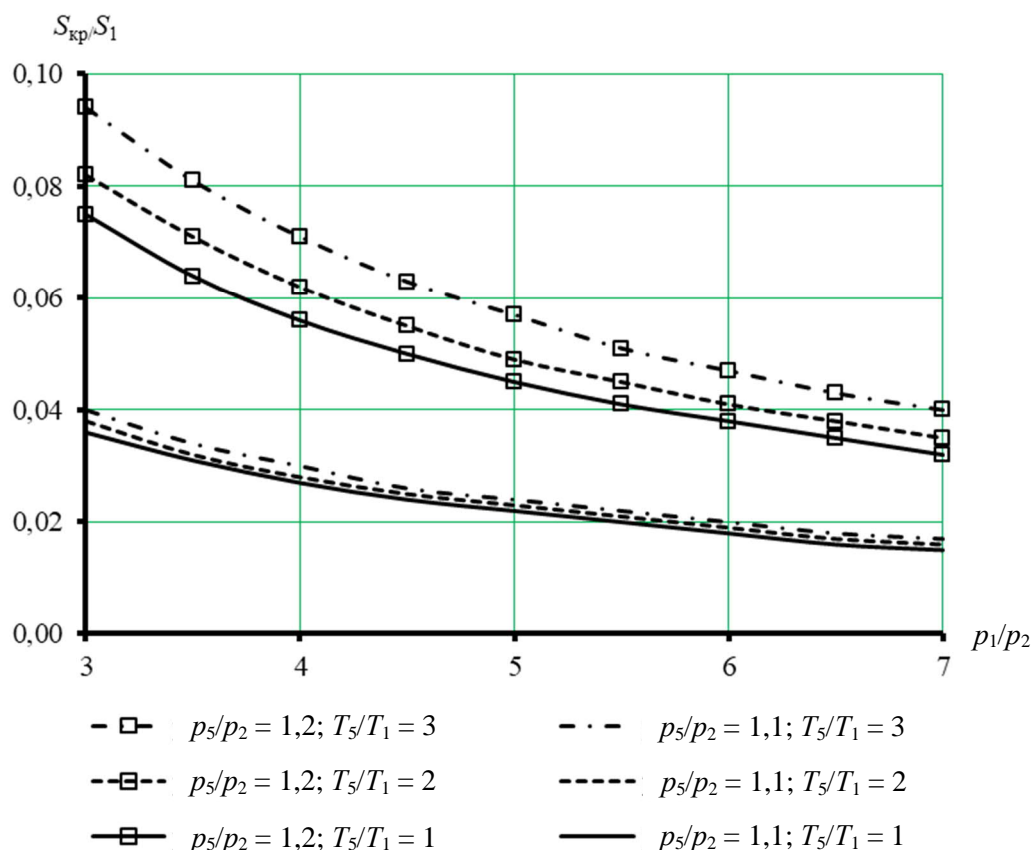


Рис. 6. Влияние степени расширения струи активного потока на соотношение площадей сечения горловины соплового устройства и загрузочного трубопровода для нескольких p_5/p_2 при $k = 1.4$, $R = 287$ кДж/(кг·К)
 Fig. 6. Influence of the active flow jet expansion ratio on the ratio of the cross-sectional areas of the nozzle throat and the charging tube for several values of p_5/p_2 at $k = 1.4$, $R = 287$ kJ/(kg·K)

Методика расчёта

Представленные расчётные зависимости (3)-(6) и графики (см. рис. 4, 5), а также рекомендации в литературе [2, 4] позволяют рассчитать основные технические показатели работы пневматического запорного устройства эжекционно-го типа (m_1 , m_2 , p_2) и спрофилировать геометрию проточной части ($d_{кр}$, d_0 , d_3 , осевые размеры). Для этого при известных параметрах в канале питания p_1 , T_1 и в выходной ёмкости (реакторе) p_5 , T_5 рассчитывают давление в приёмной камере p_2 и соотношение площадей сечения горловины соплового устройства и загрузочного трубопровода $S_{кр}/S_3$. Диаметр рабочей камеры d_3 принимают равным, исходя из размеров существующего загрузочного устройства печи. Отсюда находят диаметр горловины $d_{кр}$ соплового устройства. Далее с помощью газодинамических функций рассчитывается массовый расход активного потока газа m_1 и диаметр выходного сечения сопла d_0 .

Пример результата расчёта устройства

Рассмотрим результаты расчёта для запорного устройства с диаметром рабочей камеры $d_3 = 400$ мм, работающем при давлениях питания p_1 , равных 300, 400, 500, 600, 700 кПа, абсолютных температурах активного потока T_1 , равных 773, 873, 973 К, абсолютном давлении в печи $p_5 = 110$ кПа. При этом давление в приёмной камере приравняем к давлению в помещении цеха $p_2 = 100$ кПа. В таблице представлены результаты расчётов массового расхода активного потока m_1 и соответствующие им диаметры критического сечения сопла $d_{кр}$.

Из таблицы видно, что с увеличением давления питания газа перед соплом p_1 снижается величина требуемого диаметра горловины соплового устройства. При этом массовые расходы активного потока газа m_1 практически не меняются. Однако с увеличением температуры T_1 достигается уменьшение расхода m_1 . Таким образом, рекуперация тепловой энергии путём её передачи от реактора к активному потоку газа позволит получить экономию затрат энергии.

Таблица. Результаты расчёта массового расхода воздуха перед соплом пневматического запорного устройства эжекционного типа

Table. Calculation of the mass air flow rate in front of the ejection-type pneumatic shut-off device

Давление питания p_1 , кПа	Диаметр критического сечения сопла $d_{кр}$, мм	Температура активного потока газа T_1 , К	Массовый расход воздуха m_1 , кг/с
300	76	773	1,958
400	66	773	1,969
500	59	773	1,967
600	54	773	1,977
700	50	773	1,977
700	50	873	1,861
700	50	973	1,763

Заключение

Предложено запираение загрузочного устройства реактора осуществлять пневматическим запорным устройством эжекционного типа взамен механического аналога. Описана физико-математическая модель рабочего процесса устройства, устанавливающая взаимосвязь между физическими режимными параметрами с основными геометрическими размерами. Представлены характеристики, показывающие влияние увеличения температуры активного потока газа на снижение его массового расхода. Предложена конструкция, позволяющая организовать подачу активного потока газа для эжектирования выхлопных агрессивных газов. Описана методика расчёта запорного устройства и представлены её результаты.

Таким образом, результаты могут быть применены в качестве рекомендаций для эксплуатации устройств на промышленных предприятиях в зависимости от физических условий, геометрических размеров системы, условий монтажа.

Список источников

1. Основы металлургического производства / В.А. Бигеев, К.Н. Вдовин, В.М. Колокольцев и др. СПб.: Лань, 2017. 615 с.
2. Александров В.Ю., Климовский К.К. Оптимальные эжекторы (теория и расчёт). М.: Машиностроение, 2012. 136 с.: ил.
3. Zucker R.D., Biblarz O. Fundamentals of Gas Dynamics, 3rd Edition. Wiley, 2019. 560 p.
4. Аркадов Ю.К., Зернов В.Р., Шмуклер Б.Ю. Эжекторные системы газонаполнения аварийных плотов и трапов гражданских самолетов // Ученые записки ЦАГИ. 1992. Т. 23. № 3. С. 54-59.
5. Guerrero A.P., Paredes G.E. Linear and Non-linear Stability Analysis in Boiling Water Reactors. The Design of Real-Time Stability Monitors. Woodhead Publishing Series in Energy, 2019. 465 p.

6. Liquid-Gas Jet Pump: A Review / H. Zhang, D. Zou, X. Yang, J. Mou, Q. Zhou, M. Xu // Energies. 2022, vol. 15, no. 19. Article 6978.
7. Hydraulic characteristics of liquid-gas ejector pump with a coherent liquid jet / J. Haidl, K. Mařík, T. Moucha, F.J. Rejl, L. Valenz, M. Zednikova // Chemical Engineering Research and Design. 2021, vol. 168, pp. 435-442.
8. Bhatkar V.W., Sur A. An experimental analysis of liquid air jet pump // Frontiers in Heat and Mass Transfer. 2021, vol. 17. Article 12.
9. Research on performance optimization of gas-liquid ejector in multiphase mixed transportation device / J. Zhao, X. Wei, J. Zou, Y. Zhang, J. Sun, Z. Liu // Journal of Mechanics. 2022, vol. 38, pp. 22-31.
10. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. 3-е изд., перераб. М.: Энергоатомиздат, 1989. 352 с.
11. Бачурин А.Б., Русак А.М., Целищев В.А. Экспериментальные и теоретические исследования особенностей течения в регулируемых соплах с центральным телом // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2010. Т. 14. № 5 (40). С. 52-61.

References

1. Bigeev V.A., Vdovin K.N., Kolokoltsev V.M. *Osnovy metallurgicheskogo proizvodstva* [Fundamentals of metallurgical production]. Saint Petersburg: Lan; 2017. 615 p. (In Russ.)
2. Alexandrov V.Yu., Klimovsky K.K. *Optimalnye ezhektory (teoriya i raschet)* [Optimal ejectors (theory and calculation)]. Moscow: Mashinostroyeniye; 2012. 136 p. (In Russ.)
3. Zucker R.D., Biblarz O. Fundamentals of gas dynamics. 3rd Edition. Wiley; 2019. 560 p.
4. Arkadov Yu.K., Zernov V.R., Shmukler B.Yu. Ejector gas filling systems for emergency rafts and evacuation slides of civil aircraft. *Uchenye zapiski TsAGI* [TsAGI (Central Aerohydrodynamic Institute) Science Journal]. 1992;23(3):54-59. (In Russ.)
5. Guerrero A.P., Paredes G.E. Linear and non-linear stability analysis in boiling water reactors. The Design of Real-Time Stability Monitors. Woodhead Publishing Series in Energy; 2019. 465 p.

6. Zhang H., Zou D., Yang X., Mou J., Zhou Q., Xu M. Liquid-gas jet pump: A review. *Energies*. 2022;15(19):6978.
7. Haidl J., Mařík K., Moucha T., Rejl F.J., Valenz L., Zednikova M. Hydraulic characteristics of liquid-gas ejector pump with a coherent liquid jet. *Chemical Engineering Research and Design*. 2021;168:435-442.
8. Bhatkar V.W., Sur A. An experimental analysis of liquid air jet pump. *Frontiers in Heat and Mass Transfer*. 2021;17:12.
9. Zhao J., Wei X., Zou J., Zhang Y., Sun J., Liu Z. Research on performance optimization of gas-liquid ejector in multiphase mixed transportation device. *Journal of Mechanics*. 2022;38:22-31.
10. Sokolov E.Ya., Zinger N.M. *Struinye apparaty* [Jet devices]. Moscow: Energoatomizdat; 1989. 352 p. (In Russ.)
11. Bachurin A.B., Rusak A.M., Tselishchev V.A. Experimental and theoretical studies of flow features in adjustable nozzles with a central body. *Vestnik Ufmskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Ufa State Aviation Technical University]. 2010;14(5(40)):52-61. (In Russ.)

Поступила 05.12.2022; принята к публикации 28.01.2023; опубликована 27.03.2023
Submitted 05/12/2022; revised 28/01/2023; published 27/03/2023

Спиридонов Евгений Константинович – доктор технических наук, заведующий кафедрой гидравлики и гидропневмосистем, старший научный сотрудник, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: spiridonov@susu.ru. ORCID 0000-0001-5268-6292

Исмагилов Александр Рашидович – кандидат технических наук, доцент, научный сотрудник, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: ismagilov@susu.ru. ORCID 0000-0001-6538-0727

Хабарова Дарья Федоровна – кандидат технических наук, доцент, научный сотрудник, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: khabarovadf@susu.ru. ORCID 0000-0003-0251-0138

Evgeniy K. Spiridonov – DrSc (Eng.), Head of the Department of Hydraulics and Hydraulic and Pneumatic Systems, Senior Researcher, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: spiridonov@susu.ru. ORCID 0000-0001-5268-6292

Aleksandr R. Ismagilov – PhD (Eng.), Associate Professor, Researcher, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: ismagilov@susu.ru. ORCID 0000-0001-6538-0727

Darya F. Khabarova – PhD (Eng.), Associate Professor, Researcher, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: khabarovadf@susu.ru. ORCID 0000-0003-0251-0138

ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И РЫНОК ПРОДУКЦИИ

ECONOMICS, MANAGEMENT AND PRODUCT MARKET

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 62-05.316.42
DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-1-109-117



СОЦИОТЕХНИЧЕСКАЯ СИСТЕМНОСТЬ И УНИВЕРСАЛЬНОСТЬ СОВРЕМЕННОЙ ИНЖЕНЕРИИ: НОМО TECHNOLOGY

Жилина В.А.

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

Аннотация. В последние десятилетия наблюдаются существенные изменения в области инженерии, которые фиксируются ведущими инженерными школами, а также в требованиях промышленных отраслей к специалистам. Кроме того, сложность социального развития, резкий технологический прорыв в сферах общественных отношений трансформирует статус инженерии в основаниях техносферы. Отсюда актуализируется область исследований, связанных с состоянием технических и инженерных наук и, следовательно, нарастает потребность в анализе специфики современной инженерной деятельности. Инженерия сохраняет свой традиционный статус встраивания желаний человека в мир его обитания и вместе с тем все более претендует на приоритетные позиции в области социальных детерминант. В данном исследовании предпринята попытка определения социотехнической системности и универсальности современной инженерии через комплексный анализ нового социального феномена Номо Technology. Обращение к имеющемуся междисциплинарному опыту теоретических исследований области данной проблематики в значительной степени детерминирует выбор в качестве ведущего методологического основания анализа структурно-генетический подход. В решении сформулированных задач использованы традиционные методы научного исследования эмпирического и теоретического уровня в синтезе с методами философской рефлексии, в частности, с опорой на феноменологические школы. Предпринята попытка систематизации базовых качеств инженера Номо Technology. Доказательно раскрыта социотехническая природа инженерии в универсальности ее социальных функций. Особое внимание уделено области рисков в процессе подготовки инженера нового типа и предложены пути их минимизации. Результаты данного исследования могут быть использованы в социальной практике при анализе состояния человеческого капитала и прогнозировании основных стратегий его развития. Учет основных характеристик статуса современной инженерии может способствовать повышению конкурентоспособности отечественной инженерной школы.

Ключевые слова: инженерия, социум, Номо Technology, культура, наука, skills, техносфера, инновационное развитие, дизайн-мышление, тенхнопредпринимательство, социотехническая системность

© Жилина В.А., 2023

Для цитирования

Жилина В.А. Социотехническая системность и универсальность современной инженерии: Номо Technology // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №1. С. 109-117. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-109-117>



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

SOCIOTECHNICAL CONSISTENCY AND UNIVERSALITY OF MODERN ENGINEERING: HOMO TECHNOLOGY

Zhilina V.A.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. In recent decades, there have been significant changes in the field of engineering, which are fixed by leading engineering schools, as well as in the requirements of industrial industries for specialists. In addition, complexity of social development, a sharp technological breakthrough in social relations transforms the status of engineering in the foundations of technosphere. Hence, the field of research related to the state of technical and engineering sciences takes on increasing importance and, consequently, there is a growing need for the analysis of the specific character of modern engineering. Engineering retains its conventional status of embedding human wishes into the world of habitation and, at the same time, increasingly claims priorities in the field of social determinants. This study tries to determine sociotechnical consistency and universality of modern engineering through a comprehensive analysis of the new social phenomenon of Homo Technology. Addressing the existing interdisciplinary experience of theoretical research in the field of this issue necessarily determines the choice of a structural-genetic approach as the leading methodological basis for the analysis. When reaching the described objectives, the author used conventional methods of scientific research of the empirical and theoretical level combined with methods of philosophical reflection, in particular, based on phenomenological schools. An attempt is made to systematize the basic qualities of the Homo Technology engineer. The paper evidently reveals the sociotechnical nature of engineering in the universality of its social functions. Special attention is paid to risks in the process of training a new type of engineer, including the proposed ways to minimize them. The results of this study can be used in social practice when analyzing the state of human capital and forecasting the main strategies for its development. Taking into account the main characteristics of the status of modern engineering can contribute to improving competitiveness of the Russian engineering school.

Keywords: engineering, society, Homo Technology, culture, science, skills, technosphere, innovative development, design thinking, technological entrepreneurship, sociotechnical consistency

For citation

Zhilina V.A. Sociotechnical Consistency and Universality of Modern Engineering: Homo Technology. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 1, pp. 109-117. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-109-117>

Введение

Инженерия как самостоятельная область социальной сферы зарождается в культуре вследствие утилитарного запроса человека изменить качество жизни. В этом аспекте инженерия в ретроспективе расширяет собственные хронологические рамки, выходя за реальные границы своего «официального» возникновения, которое напрямую увязывают с появлением науки и техники как автономных феноменов культурного поля. Инженерию следует рассматривать как некое родовое свойство Разума, так как даже этимология термина увязывает ее с интеллектуальной деятельностью. При этом данная область культурного поля может рассматриваться в качестве онтологического истока культуры вообще, так как именно инженерия указывает на искусственность мира, создаваемого человеком в противоположность миру природному. Поэтому в традиционном подходе инженерия есть мультидеятельностное включение человека в мир, в качестве составных частей включаю-

щее способности человека исследовать, разрабатывать и производить.

Универсальность активности инженерии многопланова: в эпистемологическом срезе – это посредническая роль между наукой и средой обитания человека, использование основных открытых человеком законов физического мира, в социопрактическом – расширение техники и области эксплуатации природных ресурсов через создание технических и технологических процессов, в культурно-социальном – это автономность уникального знания и продуцирование особой области навыков – инженерных навыков и умений. Такая ниша в культуре всегда востребована и инженерия никогда не утрачивает актуальности и как область теоретического исследования, и как сфера особой активности человека в социуме. Вместе с тем каждая историческая эпоха накладывает отпечаток на суть и содержание инженерных практик, а век XXI позволяет констатировать определенное вращение инженерии в иные формы деятельности человека и фиксировать его инновационный статус в мире в качестве Homo Technology.

Теоретическая мысль XXI века акцентирует значимость понимания взаимоотношений между научным и инженерным сообществом в анализе современного социального мира. Недаром в философской рефлексии возникает новое направление – философия инженерии, предметная область которой постоянно расширяется. Помимо традиционной философской проблематики, такой как социальные последствия технизации общественных отношений или технологической этики, данная отрасль философии особо занимается демаркацией науки, технологии и инженерии. Будучи автономными и несводимыми друг к другу, эти разные виды деятельности собираются в едином носителе – в Homo Technology [6]. Но современный инженер никак не может быть сведен к набору технологий. Гибкость инженерии и восприимчивость к социальной динамике традиционна для данной сферы деятельности человека. Однако в настоящее время такая адаптивность инженера иная. Вписанный в сложный мир постоянной социальной динамики, где неустойчив рынок трудовых ресурсов и сама профессиональная платформа [2]: многие привычные профессии становятся анахронизмом, одновременно появляются те, о которых еще вчера и не предполагали, инженер более не сводим к функционалу. Акцент переносится на сферы профессиональной методологии и когнитивных практик [10].

Следует отметить, что научная составляющая современных технологий представляет собой автономный детерминационный фактор развития всей технологической сферы. В частности, достижения биомедицинских инноваций в обратном влиянии на науку способствуют конкретизации понятия междисциплинарного подхода формированием концепции информированного согласия [13]. В условиях коммуникативного общества три ведущие научные информационные платформы Scopus, Google Scholar и Web of Science специально систематизируют модели согласия. Результатом такого анализа, в частности, можно считать фиксацию 207 моделей согласия, в основании которых лежат модифицированные подходы к определению истины в качестве конечного критерия эффективности современной науки. Доминанта конвенционального подхода позволяет создать сетевую визуализацию, отображающую, какие модели встречаются в основном в одном поле науки, а какие модели перекрываются между полями наук. Отмеченные процессы в целом актуализируют общее поле исследований особенностей сферы со-

временной инженерии. Целью данного исследования определена систематизация основных черт деятельности Homo Technology в условиях технизации основных сфер социума. В реализации поставленной цели, соответственно, предполагается решение следующих задач: проанализировать социотехнический статус современной инженерии в аспекте деятельности основных институтов культуры, в частности в трансформациях системы образования; раскрыть специфику инженерии как детерминанты целостности базовых качеств современной личности; определить роль инженерии в современных инновационных тенденциях развития социума и науки.

Устойчивый конфликт знания и компетенции в формировании основ профессиональной деятельности современного инженера. Современная неопределенность социальных процессов, выражающаяся в доминировании изменчивости над устойчивостью, неизбежно трансформирует статус инженерии как самостоятельной сферы социума. Это связано с тем, что в истоках возникновения инженерная деятельность возникает как снятие разрыва прогресса науки и технологии с повседневностью существования человека. Тем самым можно констатировать своеобразный личностный аспект данного рода деятельности человека, что во многом, например, детерминирует появление в XXI веке философии инженерии как самостоятельной новой отрасли философского знания. Косвенным доказательством подобия развития инженерной мысли истории эволюции философии может служить тот факт, что и западные, и китайские концепции философии инженерии, замкнутые сами на себя, тем не менее синхронизированы в предметных областях.

Логично, что историческое развитие инженерии приводит к усилению сегмента субъективности: базовые качества личности, степень способности к действию, оценочная критериальность предполагаемых результатов действия становятся основными параметрами профессиональной успешности. Более того, универсальность инженерной деятельности вследствие этого приводит к необходимости пересмотра знамевой концепции образования в целом и детерминирует развитие компетентностного подхода: skills начинают мерять даже гуманитарную сферу. В сфере инженерии данные процессы разворачиваются на фоне еще одной существенной трансформации: англосаксонская модель профессиональной деятельности как следование алгоритмам и правилам активно вытесняется так

называемой континентальной, когда сама деятельность инженера есть многопользовательская игра. Отсюда в обратной связи происходит «обработка» hard skills гуманитарными оболочками, когда даже профессиональные компетенции все более превращаются в предметно-системные: вне привязки к уровню знания инженер мыслится успешным и востребованным, если владеет логикой изложения точки зрения, демонстрирует методы критического анализа и т.д.

Помимо таких общих тенденций, конфликт между знаниями и компетенциями в подготовке инженера Homo Technology детерминирован принципиальной трансформацией производственной сферы, лежащей в основаниях Индустрии 4.0. Так, одной из самых перспективных и инновационных технологий сегодня является аддитивное производство, которое требует качественно иной подготовки молодых инженеров. И тем самым проблема соотношения знания и компетенции начинает касаться должным образом и подготовленного преподавательского состава.

Применительно к студенчеству следует констатировать, что фундаментальные компетенции сегодня также должны быть специализированы. В частности, в университетах Южной Африки обучение студентов, изучающих машиностроение и промышленную инженерию, строится на приоритете знания аддитивных технологий, они связаны с проектированием и разработкой продукта и производством в целом [4]. Следовательно, система компетенций Homo Technology должна демонстрировать понимание и анализ инженерных проблем, улучшение навыков проектирования и визуализации и расширение возможностей использования приложений автоматизированного проектирования. Недаром ведущие инженерные школы развитых стран стимулируют самостоятельное обучение и технологии «обучения путем создания», что одновременно облегчает понимание теоретических тем [14]. Видимо, складывается впечатление, что эти тенденции должны абсолютно обогатить подготовку студентов-инженеров, чтобы сделать их все более и более подготовленными к вхождению в современный рынок труда, где навыки, связанные со всеми доступными технологиями Индустрии 4.0, пользуются большим спросом. То есть новые потребности действительно требуют пересмотра программ инженерных курсов. Более того, новая система компетенций становится самоорганизованной и развивающейся: она внутри продуцирует новые компетенции за счет имеющихся. Знание аддитивной технологии, например, позволяет студентам одновременно изучать дизайн.

Программа «сделай сам» в процессе стажировки формирует soft skills. Но внутри образовательного процесса такие тенденции создают конфликтные ситуации. В частности, изменение ориентации на активное обучение и непосредственное участие студентов в проекте не всегда позитивно воспринимаются преподавательским составом, ориентированным более на методы обучения, основанные на знаниях. Соответственно, складывается нехватка преподавателей, обладающих хорошим уровнем знаний особенностей этих методик [9]. Другим негативным моментом выступает усиление конкуренции в области качества знания у молодого специалиста: в подготовке необходим элемент опережения текущего технологического времени. Возникают и «технические» проблемы: стоимость оборудования для обучения, необходимость реализации неких обучающих фабрик и т.д.

Технопредпринимательская оболочка инженера Homo Technology – модератора между человеком и средой. Социотехническая среда современного человека специфична тем, что заставляет своего носителя постоянно выходить за пределы самого себя. Еще А. Эйнштейн акцентировал внимание на том, что когда наука прочно входит в жизнь человека, она заставляет постоянно расширять человеческие горизонты: нельзя решить проблему теми же средствами или инструментами, которые ее создали. Homo Technology – это совокупность творческих решений: он меняет мир, постоянно меняя себя. Отсюда улучшение современного инженерного образования многопланово – от развития критического мышления, креативности и неструктурированного решения проблем до междисциплинарного и системного мышления, коммуникации и сотрудничества, устойчивого развития и ответственного проектирования.

В западных инженерных школах алгоритмом реализации такой модели обучения была определена стратегия «conceive–design–implement–operate (CDIO)»: Задумай – Спроектируй – Реализуй – Управляй. Подход CDIO был внедрен по всему миру в более чем 120-ти университетах-партнерах и в различных инженерных дисциплинах (аэрокосмическая промышленность, прикладная физика, электротехника и машиностроение) [8]. Составляющая «Реализуй» напрямую выводит на компетенции экономической ориентации. Следует отметить, что, например, в ЕС университетское образование включено в стратегию «Предпринимательство 2020» [15]. В стратегии CDIO формируется также потенциальная мотивация

студента на создание реальной ценности за пределами университетской среды. По факту именно предпринимательские компетенции раскрывают деятельностно-активный характер инженера нового типа, так как технопредпринимательство есть результат навыка предпринимательской деятельности, что развивает личностные качества, креативность, уверенность в себе, проявление инициативы, ориентацию на действие.

Данные тенденции подготовки инженеров нового типа констатируют тот факт, что профессиональная сфера будущего специалиста расширена и с необходимостью включает в себя контакты с местными сообществами, экологическими группами, неправительственными организациями, акционерами, регулирующими органами и т.д. Этим инженер Homo Technology отличается от высококвалифицированного рабочего или технолога. Он не просто проектирует элементы техносферы, но и формирует руководство к действию включенных в техносферу. Другими словами, принципиально изменена креативность в инженерной деятельности. Создание и разработка нового механизма уступает приоритет иному процессу – процессу встраивания технологий в ценности жизненного мира человека. Инженер подотчетен социуму, он обязан получить «социальную лицензию» на деятельность. Профессиональная деятельность Homo Technology – это симбиоз социальных ожиданий человека повседневности, экономических требований времени, политических отношений в сфере геополитики, культурных особенностей каждой страны. Это определенный стиль мышления, а не набор навыков. И это мышление постоянно стремится стать объективированным: идея должна быть воплощена в ценности для других, причем эта ценность может быть финансовой, культурной или социальной. И это свидетельствует об особой роли инженерии в состоянии современной культуры – она является скрепой целостности социума. Инженер продуцирует целый вектор общественных связей и отношений. Создаваемая ценность, например, создает контакты с людьми с различным опытом работы, таким как бизнес, маркетинг, гуманитарные науки и юриспруденция.

Другим немаловажным значимым фактом является влияние инженерии на состояние аксиологической сферы социальных отношений. Ведущие инженерные школы даже специально включают в процесс подготовки инженера курсы по этике. Более широко за аксиологическую сторону профессиональной инженерной деятельности отве-

чают дисциплины социального проектирования. Интересным моментом здесь является укрепление междисциплинарного характера инженерии, так как социальные ценности в ее области могут иметь место только на прочной основе естественных наук и собственного инженерного дела. Однако в ценностном срезе инженерной деятельности в современных условиях нарастают и конфликты. Так, технологические ценности – эффективность, точность, экономичность, прочность – это, скорее, инструментарий аксиологической сферы, чем сами ценности. К тому же, в эпоху цифровизации в обществе складывается разрыв между традиционными ценностями культуры, вбирающими в себя исторический опыт человечества, и ценностями сетевой среды, отличными от традиционных и не имеющих преемственного культурного основания [16]. Проблемной областью выступает выбор методологии обучения. В частности, преподавание «через» (основанный на процессе эмпирического подхода, при котором студенты проходят реальный процесс обучения проектированию и предпринимательству) вытесняет преподавание «о» (содержательный теоретический подход) и преподавание «для» (профессионально ориентированный подход на определенную социальную роль инженера, в том числе и на предпринимателя). Вместе с тем обучение «на практике» начинает вытеснять традиционные методы обучения, например лекции. Теперь преподаватель, скорее, модератор.

Дизайн-мышление инженера Homo Technology. Универсальность современной инженерии находит свое выражение в креативных техниках познавательного подхода. Дизайн-мышление – это инновационный, ориентированный на человека подход к определению и решению сложных проблем. Изначально концепция разрабатывается в бизнесе для стимулирования инноваций, но сегодня уверенно занимает нишу в образовании, так как способствует развитию творческой уверенности [7]. В этих практиках инженерия демонстрирует социотехническую природу как на уровне социального бытия, так и в эпистемологическом аспекте. В первом случае дизайн-мышление выступает фундаментальной характеристикой субъекта как его способность создавать эффективные изменения. На уровне гносеологического освоения мира процесс дизайн-мышления определяется как нелинейный и интегративный процесс, состоящий из пяти шагов и требующий от инженера умения определять параметры проблемы, выявлять потребности, справляться с раз-

личными уровнями двусмысленности, активно решать проблемы и устанавливать связи между их жизнью внутри университета или организации и за их пределами [7].

Инженер Homo Technology ориентирован не на прикладные технические науки, а на применение дизайна и креативности к самой науке. Отсюда сложность самого феномена Homo Technology: в его природе заложена ориентация на интуитивное схватывание проблемы, а это в рамках научно-структурированного мышления всегда сложно. Вместе с тем, поскольку инженерные проблемы становятся все более сложными, а их решение требует навыков и методов, отличных от рациональных методов решения проблем, которые в настоящее время рассматриваются в большинстве инженерных учебных программ, дизайн-мышление открывает новый путь для решения реальных проблем творческим, инновационным и предпринимательским способом. Западные инженерные школы даже формулируют особый кодекс дизайн-мышления, закрепленный в D.school guide и структурированный на пять фаз самого процесса: сопереживание, определение, идея, прототипирование и тестирование. Опыт представляется ценным, так как традиционная ориентация отечественных инженерных школ на линейное решение проблем во многом опирается на систему лапласовского детерминизма. Между тем подлинно новое в проектировании не может быть однолинейным и одноразовым. Напротив, многократное повторение и есть путь сужения общетеоретического уровня до конкретного запроса практики [12]. И в целом это отвечает тенденциям развития социальной среды, в характеристиках которой доминирует неопределённость. Отсюда цифровые технологии следует рассматривать не как некоторый вспомогательный инструментарий, а как принципиально новый исследовательский навык Homo Technology. Инженерия становится социотехническим явлением благодаря внутренним трансформациям. Так, цифровой двойник – это не модель, которую утилитарно использует инженер. Это визуализация части среды в ее неопределённости. И это возвращает к первой выделенной в данном исследовании проблеме – к конфликтному единству знания и компетенции. В частности, в современных условиях в сфере визуализации необходимо четкое разделение знания и навыка.

Безусловно, новая инженерия строится в сфере цифровизации. Так, например, виртуальное прототипирование означает использование программного обеспечения для автоматизированного

проектирования (CAD/CAE), способного анализировать механические устройства в единой параметрической среде [5]. Внедрение цифры приводит к важным изменениям в мире инженерии. В сфере навыка будущего специалиста полностью параметрическое представление объектов позволяет уточнить идеи перед внедрением производственного процесса, ограничивая источник ошибок, а также затраты. Одновременно эти процессы раскрывают сложный социотехнический характер современной инженерии, так как технологии CAE используются для точного моделирования поведения и поддержки инженеров на протяжении всего процесса проектирования, претендуя на статус универсальной методологии. А это, в свою очередь, демонстрирует влияние инженерии на основные социальные характеристики реальности. Так, например, очевидно, что по сравнению с физическим тестированием виртуальные модели имеют явные преимущества с точки зрения экономики средств и возможности протестировать производительность нескольких вариантов предлагаемых решений за ограниченное время.

Материалы и методы исследования

Исследование социотехнической системности современной инженерии и универсальности ее в системе социальных связей предполагает применение новых методологических подходов. В частности, в повышении эффективности применяемых научных методов и методов междисциплинарного анализа необходим учет возможностей философских рефлексий. Общей методологической платформой служит синергетика в аспекте моделирования инженерии в качестве системы самоорганизации, а ведущим методологическим основанием выбран структурно-генетический подход. Для организации теоретического материала использован метод восхождения от абстрактного к конкретному, системно-структурный подход, взятые в диалектическом аспекте.

Исследование опирается на достижения теоретического анализа состояния и специфики инженерии как особой области культуры [1-3, 6, 10, 12]. Современная теоретическая мысль активно обобщает опыт инновационных подходов в сфере подготовки инженера нового типа [7, 8, 11]. Особую значимость для проведения данного анализа представляют работы, демаркирующие различные инженерные школы [1, 4, 6], что позволяет выделить общие существенные черты состояния современной инженерии. В понимании реальной социальной роли Homo Technology

задействованы исследования в области проблем цифровизации инженерной деятельности [5, 9, 11, 13]. Общая структура систематизации социотехнического статуса инженерии опирается на теоретический опыт исследования целостности человеческого капитала [2, 16].

Полученные результаты и их обсуждение

Капитализм производит существенный переворот в человеческой истории. Если предшествующие ему эпохи ориентируют человека на завоевание готовых благ, то с его приходом миссия человека в мире меняет акцент: теперь главное то, что он сам производит и сам присваивает все ему необходимое. Отсюда постоянная потребность в науке и технике, которые по мере их автономизации в культуре активно включаются в систему детерминант социального развития. И техногенный характер XXI века как бы доводит до логического результата этот процесс: все коллизии, все противоречия, все конфликты – это грани антагонизмов научного и технического потенциалов стран. Однако следует отметить, что сегодня, как никогда, человеческая история далека от состояния комфорта, стабильности и устойчивости. Исследование причин этого приводит к парадоксальному решению. Основание нарастания деградации в социальных отношениях находится все в том же капитализме: в силу собственных закономерностей он изначально превращает человека в меновую стоимость, в единицу научных или технических систем. Человек становится инструментом деятельности. А сама деятельность в синтезе науки и техники вследствие ориентации на максимальный практический успех и экономическую прибыль все более начинает восприниматься человеком как некий набор технологий. Это создает почву для формирования иллюзии некоторого образа универсального человека XXI века, погруженного в мир внеличностных истин. Общество как автономный организм чувствует опасность такого рода риска, пытается его минимизировать, но разрушить данную иллюзию непросто.

В российском обществе, например, предпринимается попытка преодолеть такое обезличивание через трансформирование сферы подготовки специалистов в переходе от знаний к компетенциям. Но, несмотря на уже солидный временной багаж, компетентностный подход в обучении не только не демонстрирует прорывной эффективности, но и воспринимается в оценках человеческого капитала преимущественно негативно. В геополитическом срезе состояния всего человечества си-

туация выглядит еще более тревожной: самый поверхностный анализ социальной сферы ставит под сомнение наличие рациональных элементов в развитии международного поля.

Вместе с тем среда обитания человека действительно существенно трансформирована. Современная культура утрачивает статичный характер и становится процессуальной. Видимо сокращается публичная сфера социальных отношений. Меняются и константы: наука без границ часто оказывается вне науки, техника начинает уступать свою роль «пространству потоков». Взаимодействие человека с постоянно ускользающими и меняющимися технологиями не позволяет сформулировать четкое понимание себя. Возникает необходимость возвращения стабильности жизненного мира, где человеческие запросы не сводимы к алгоритмам технологий. Этим объясняется возросший интерес к инженерии, которая уже в своих истоках ориентирована на обычного человека и его жизненный мир. Вместе с тем эта сфера деятельности во многом испытывает влияние происходящих в социуме процессов, и в век доминанты техники зачастую предпринимаются попытки, например, свести роль инженера к обслуживанию машин. Недаром современные исследователи не только поднимают вопрос о значимости демаркации социальных ролей высокопрофессиональных рабочих, технологов и инженеров, но и заявляют, что попытка определения статуса инженера через то, что он формально может делать в рамках своих профессиональных обязанностей, остается безуспешной и приводит скорее к комичным результатам: инженеры делают примерно то же, что бобры и муравьи при построении плотин и муравейников. Инженерия не сводима к материальным артефактам культуры. Современный инженер, традиционно опираясь на три вида деятельности – исследование, разработка, производство, не столько проектирует элементы техносферы, сколько создает руководство к действию, неприметным образом встраивая в технологии ценности жизненного мира.

Таким образом, современная инженерия представляется сложным социальным явлением, область функционирования которого неразрывно связана с творческим мышлением человека. Номо Technology можно рассматривать как систему всех основных тенденций социального развития и одновременно именно статус инженера нового типа в обратной связи стратегически определяет вектор существования человечества в целом.

Заключение

Таким образом, в исследовании основных параметров инженерии как социального феномена впервые констатирована ее роль в качестве ведущей детерминанты развития общества. Новый статус инженера Homo Technology – это единство науки, техники, инжиниринга в сложной целостности современного коммуникативного общества. Глобальная конкуренция и междисциплинарный характер развивающейся деятельности в области инженерии требует качественно иной подготовки инженера нового типа. В обратной связи инновационный характер деятельности таких специалистов меняет природу социума и социального развития в целом.

Список источников

1. Антохина Ю.А., Прохорова В.Б. Инженерная школа XXI века // Аккредитация в образовании. 2016. №4(88). С. 18-21.
2. Жилина В.А. Онтологические основания цикличности в разворачивании человеческого духа // Вестник Челябинского государственного университета. 2009. № 11 (149). С. 28-34.
3. Пинчук А.Ю. Формирование отечественной инженерной школы как формы эффективного ответа российского общества на большие вызовы // ЦИТИСЭ. 2021. № 1 (27). С. 425-435.
4. Alabi M.O., de Beer D.J., Wichers H., Kloppers C.P. Framework for effective additive manufacturing education: a case study of South African universities // Rapid Prototyp J. 2019, vol. 26, pp. 801-826. <https://doi.org/10.1108/RPJ-02-2019-0041>
5. Berselli G., Bilancia P. & Luzi L. Project-based learning of advanced CAD/CAE tools in engineering education // Int J Interact Des Manuf. 2020, vol. 14, pp. 1071-1083. <https://doi.org/10.1007/s12008-020-00687-4>
6. Bo-cong L. The Rise of Philosophy of Engineering in the East and the West. In: Poel, I., Goldberg, D. (eds) Philosophy and Engineering: Philosophy of Engineering and Technology. 2009, vol. 2. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2804-4_3
7. Carroll M.P. Shoot for the moon! The mentors and the middle schoolers explore the intersection of design thinking and STEM // J Pre-Coll Eng Educ Res (J-PEER). 2014, vol. 4, no. 1, pp. 14-30.
8. CDIO. <http://cdio.org/about>. Accessed 20 June 2020.
9. Chong S., Pan G.T., Chin J., Show P.L., Yang T.C.K., Huang C.M. Integration of 3D printing and Industry 4.0 into engineering teaching. Sustainability. 2018, vol. 10, no. 11, pp. 3960. <https://doi.org/10.3390/su10113960>
10. Davis M. Distinguishing Architects from Engineers: A Pilot Study in Differences Between Engineers and Other Technologists. In: Poel, I., Goldberg, D. (eds) Philosophy and Engineering: Philosophy of Engineering and Technology. 2009, vol. 2. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2804-4_2
11. DSchool (2020) An introduction to design thinking – Process guide. <https://dschool-old.stanford.edu/sandbox/groups/designresources/wiki/36873/attachments/74b3d/ModeGuideBOOTCAMP2010L.pdf>. Accessed 24 May 2020
12. Kamp A. Engineering Education in a Rapidly Changing World. Rethinking the Vision for Higher Engineering Education, 2nd, 2016.
13. Loosman I., Nickel P.J. Towards a Design Toolkit of Informed Consent Models Across Fields: A Systematic Review // Science and Engineering Ethics. 2022, vol. 28, no. 5, pp. 1-19. <https://doi.org/10.1007/s11948-022-00398-x>
14. Motyl B., Filippi S. Trends in engineering education for additive manufacturing in the industry 4.0 era: a systematic literature review // Int J Interact Des Manuf. 2021, vol. 15, pp. 103-106. <https://doi.org/10.1007/s12008-020-00733-1>
15. Sörensen A., Mitra R., Hulthén E. et al. Bringing the Entrepreneurial Mindset into Mining Engineering Education // Mining, Metallurgy & Exploration. 2022, vol. 39, pp. 1333-1344. <https://doi.org/10.1007/s42461-022-00620-1>
16. Zhilina V.A., Kuznetsova N.V., Akhmetzyanova M.P., Zhilina E.A. Modern characteristics and mechanisms of identification of social subject // European Proceedings of Social and Behavioural Sciences EpSBS. International Scientific Conference dedicated to the 80th anniversary of Turkayev Hassan Vakhitovich. Kh. I. Ibragimov Complex Research Institute. Grozny. 2020. С. 2742-2749.

References

1. Antokhina Yu.A., Prokhorova V.B. Engineering school of the 21st century. *Akkreditatsiya v obrazovanii* [Accreditation in Education]. 2016;(4(88)):18-21. (In Russ.)
2. Zhilina V.A. Ontological framework for a cyclic nature of development of the human spirit. *Vestnik Chelyabinskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Chelyabinsk State University]. 2009;(11(149)):28-34. (In Russ.)
3. Pinchuk A.Yu. Development of the Russian engineering school as a form of an efficient response to grand challenges. *TsITISE* [CITISE (Center of Innovative Technologies and Social Expertise)]. 2021;(1(27)):425-435. (In Russ.)
4. Alabi M.O., de Beer D.J., Wichers H., Kloppers C.P. Framework for effective additive manufacturing education: a case study of South African universities. *Rapid Prototyp J.* 2019;26:801-826. <https://doi.org/10.1108/RPJ-02-2019-0041>
5. Berselli G., Bilancia P., Luzi L. Project-based learning of advanced CAD/CAE tools in engineering education. *Int J Interact Des Manuf.* 2020;14:1071-1083. <https://doi.org/10.1007/s12008-020-00687-4>
6. Bo-cong L. The rise of philosophy of engineering in the East and the West. Edited by Poel I., Goldberg D. *Philosophy and Engineering: Philosophy of Engineering and Technology.* 2009;2. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2804-4_3

7. Carroll M.P. Shoot for the moon! The mentors and the middle schoolers explore the intersection of design thinking and STEM. *J Pre-Coll Eng Educ Res (J-PEER)*. 2014;4(1):14-30.
8. CDIO. <http://cdio.org/about>. Accessed on June 20, 2020.
9. Chong S., Pan G.T., Chin J., Show P.L., Yang T.C.K., Huang C.M. Integration of 3D printing and Industry 4.0 into engineering teaching. *Sustainability*. 2018;10(11):3960. <https://doi.org/10.3390/su10113960>
10. Davis M. Distinguishing architects from engineers: A pilot study in differences between engineers and other technologists. Edited by Poel I., Goldberg D. *Philosophy and Engineering: Philosophy of Engineering and Technology*. 2009;2. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2804-4_2
11. DSchool. An introduction to design thinking: Process guide. <https://dschool-old.stanford.edu/sandbox/groups/designresources/wiki/36873/attachments/74b3d/ModeGuideBOOTCAMP2010L.pdf>. Accessed on May 24, 2020.
12. Kamp A. Engineering education in a rapidly changing world. Rethinking the vision for higher engineering education, 2nd. 2016.
13. Loosman I., Nickel P.J. Towards a design toolkit of informed consent models across fields: A systematic review. *Science and Engineering Ethics*. 2022;28(5):1-19. <https://doi.org/10.1007/s11948-022-00398-x>
14. Motyl B., Filippi S. Trends in engineering education for additive manufacturing in the industry 4.0 era: a systematic literature review. *Int J Interact Des Manuf*. 2021;15:103-106. <https://doi.org/10.1007/s12008-020-00733-1>
15. Sørensen A., Mitra R., Hulthén E. et al. Bringing the entrepreneurial mindset into mining engineering education. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2022;39:1333-1344. <https://doi.org/10.1007/s42461-022-00620-1>
16. Zhilina V.A., Kuznetsova N.V., Akhmetzyanova M.P., Zhilina E.A. Modern characteristics and mechanisms of identification of social subject. *European Proceedings of Social and Behavioural Sciences EpSBS. International Scientific Conference dedicated to the 80th anniversary of Turkayev Hassan Vakhitovich. Kh. I. Ibragimov Complex Research Institute*. 2020;2742-2749.

Поступила 06.02.2023; принята к публикации 16.02.2023; опубликована 27.03.2023
Submitted 06/02/2023; revised 16/02/2023; published 27/03/2023

Жилина Вера Анатольевна – доктор философских наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: vera-zhilina@yandex.ru. ORCID 0000-0003-2954-109X

Vera A. Zhilina – DrSc (Philosophy), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: vera-zhilina@yandex.ru. ORCID 0000-0003-2954-109X

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 65.011.4
DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-1-118-125



РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ СИСТЕМЫ КРІ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

Пономарева О.С.¹, Майорова Т.В.¹, Приймак В.А.²

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

² ОАО «ММК-МЕТИЗ», Магнитогорск, Россия

Аннотация. В результате анализа проблемы по исследованию различных подходов к управлению предприятием металлургической отрасли была поставлена цель определить наиболее эффективную систему управления для группы бюджетного планирования и управления оборотными активами ОАО «ММК-МЕТИЗ». Проанализирована система бюджетирования, применяемая на предприятии, выявлены основные недостатки. Определено, что управление, использующее бюджет предприятия как единственный критерий достижения стратегических целей, не обеспечивает оценку нематериальной составляющей успеха деятельности предприятия. Рассмотрена система ключевых показателей эффективности (КРІ), которая отражает трансформацию стратегии предприятия в совокупность взаимосвязанных и сбалансированных показателей оценки эффективности. Разработка значимых ключевых показателей эффективности, которые отслеживают и четко визуализируют производительность, требует определенного планирования. Каждый показатель должен соответствовать конкретному бизнес-процессу и предоставлять своевременную и точную информацию для оценки прогресса в достижении целей. Разработана система ключевых показателей эффективности для группы бюджетного планирования и управления оборотными активами ОАО «ММК-МЕТИЗ». Определены основные бизнес-процессы группы бюджетного планирования и управления оборотными активами ОАО «ММК-МЕТИЗ» и ее производственные показатели. Внедрение системы КРІ даст предприятию возможность определить стратегические, финансовые и операционные достижения компании, опираясь на четкие показатели эффективности бизнес-процессов, что будет способствовать оптимизации усилий всех подразделений. Мониторинг деятельности предприятия сведется не только к анализу отклонений показателей хозяйственной деятельности от плановых, но к оценке текущих результатов достижения стратегических целей. Система КРІ позволит мотивировать персонал на повышение эффективности деятельности в целом.

Ключевые слова: система, управление, стратегия, ключевые показатели эффективности, показатели результативности, производственные показатели

© Пономарева О.С., Майорова Т.В., Приймак В.А., 2023

Для цитирования

Пономарева О.С., Майорова Т.В., Приймак В.А. Разработка и внедрение системы КРІ на предприятиях металлургической отрасли // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №1. С. 118-125. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-118-125>



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

DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF THE KPI SYSTEM AT METALLURGICAL ENTERPRISES

Ponomareva O.S.¹, Maiorova T.V.¹, Priymak V.A.²

¹ Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

² OJSC MMK-METIZ, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Having analyzed the issue of the study on various approaches to management of metallurgical enterprises, the authors set an objective: to determine the most efficient management system for the Group of Budget Planning and Current Assets Management of OJSC MMK-METIZ. The budgeting system used at the enterprise was analyzed with the identification of main disadvantages. It was determined that management, using the enterprise budget as the only one criterion for achieving strategic goals, did not provide an assessment of an intangible component of success of the enterprise performance. The authors describe a system of key performance indicators (KPIs), which reflects the transformation of the company's strategy into a set of interrelated and balanced performance indicators. Developing meaningful key performance indicators that track and clearly visualize performance requires definite planning. Every indicator should correspond to a specific business process and provide timely and accurate information to assess the progress towards achieving goals. A system of key performance indicators has been developed for the Group of Budget Planning and Current Assets Management of OJSC MMK-METIZ. The authors determined main business processes of the Group of Budget Planning and Current Assets Management of OJSC MMK-METIZ and its performance indicators. The implementation of the KPI system will provide the company with the opportunity to determine strategic, financial and operations goals of the company based on clear indicators of efficiency of business processes, contributing to optimizing effort of all the departments. Monitoring of the company's activities will be reduced not only to the analysis of deviations of business indicators from planned figures, but also to the assessment of the current results of achieving strategic goals. The KPI system will motivate the staff to improve efficiency of their activities in general.

Keywords: system, management, strategy, key performance indicators, effectiveness indicators, production performance

For citation

Ponomareva O.S., Maiorova T.V., Priymak V.A. Development and Implementation of the KPI System at Metallurgical Enterprises. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 1, pp. 118-125. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-118-125>

Введение

В современных условиях хозяйствования неэффективное управление – наиболее распространенная внутренняя причина, мешающая российским компаниям в преодолении кризиса. Решить поставленную проблему можно путем повышения эффективности существующих моделей управления, а также поиском более эффективных инструментов управления организацией, соответствующих современным требованиям.

Управление промышленным предприятием – сложный процесс, требующий единой направленности всех подразделений на достижение стратегических целей. Грамотно сформулированная стратегия определяет конкурентное преимущество предприятия, которое позволит успешно развиваться в агрессивной бизнес-среде. Однако способность предприятия реализовывать стратегию значительно важнее, чем сама стратегия, так как без четкого механизма ее реализации намеченные цели останутся лишь благими намерениями [1, 2].

На сегодняшний день управление металлургическими предприятиями осуществляется, в основном, на основе системы бюджетирования. Основная цель, которая преследуется при разработке бюджетов, – снижение себестоимости продукции [3]. Однако это не всегда способствует повышению эффективности деятельности предприятия в целом. Система бюджетирования на предприятии имеет ряд недостатков. Во-первых, отсутствие гибкости бюджетов. Вторым недостатком системы бюджетирования является отсутствие мотивации для работников компании. Это связано с тем, что, во-первых, бюджеты не доведены до сведения каждого сотрудника, следовательно, они не оказывают никакого влияния на мотивацию и результаты работы, а воспринимаются им исключительно как средство для оценки деятельности и отслеживания ошибок [4]. Во-вторых, существуют противоречия между достижением целей и их стимулирующим эффектом. Третьим недостатком является отсутствие взаимосвязи между планами и размещением ресурсов,

с одной стороны, и долгосрочными стратегическими приоритетами – с другой.

На предприятии перспективное стратегическое планирование и составление годового бюджета представляют собой два совершенно независимых процесса. Как следствие, распределение ресурсов зачастую никакого отношения к стратегическим приоритетам не имеет [5, 6]. На пути реализации стратегии промышленное предприятие сталкивается со следующими барьерами: барьер видения, барьер человеческого фактора, барьер оценки и барьер ресурсов. Для решения данных проблем возможно использование системы ключевых показателей эффективности Key Performance Indicators (KPI). Показатель эффективности – это система оценки, которая помогает предприятию определить достижение стратегических и тактических (операционных) целей с помощью ряда показателей [7-9].

Управление промышленным предприятием на основе системы KPI позволит вовремя оценивать динамику развития предприятия и достижения им определенных стратегией целей на каждом уровне управления, а также выявлять проблемные области, требующие принятия корректирующих решений. KPI также выступают в качестве важных инструментов принятия управленческих решений. Производительность должна определять бизнес-решения, а ключевые показатели эффективности должны стимулировать действия.

Полученные результаты и их обсуждение

ОАО «ММК-МЕТИЗ» входит в группу компаний ПАО «ММК» и является частью гарантированного рынка сбыта головной компании, вследствие этого предприятие вынуждено следовать политике компании. Данная зависимость вызывает определенные трудности в условиях неопределенности рынка. Также структурные подразделения, занимающиеся исследовательской работой, не вписываются в рамки негибкого бюджета [10, 11].

На сегодняшний день управление металлургическим предприятием осуществляется, в основном, на основе системы бюджетирования. Основным недостатком бюджетирования в ОАО «ММК-МЕТИЗ» является отсутствие взаимосвязи стратегических целей предприятия, его структурных подразделений с операционной деятельностью и отсутствие взаимосвязи бюджетов с показателями премирования конкретных работников.

Стратегическими целями ОАО «ММК-МЕТИЗ» являются:

- производство продукции, соответствующей современным и перспективным требованиям потребителей. Улучшение качества выпускаемой продукции;
- развитие существующих и освоение новых рынков сбыта металлоизделий;
- повышение эффективности производства и снижение производственных затрат.

Для повышения эффективности деятельности ОАО «ММК-МЕТИЗ» предлагается рассмотреть возможность внедрения системы управления результатами деятельности на основе ключевых показателей эффективности.

Внедрение системы KPI на промышленном предприятии необходимо провести в несколько этапов:

1. Формирование стратегии.
2. Определение важнейших факторов успеха.
3. Определение ключевых бизнес-процессов в структурных подразделениях предприятия.
4. Определение ключевых показателей эффективности.
5. Разработка и оценка сбалансированной системы показателей.
6. Декомпозиция целевых показателей на все уровни управления.

Внедрение системы управления на основе KPI в ОАО «ММК-МЕТИЗ» предлагается осуществлять сотрудниками предприятия с процессным привлечением внешних консультантов. Рекомендуется разрабатывать ключевые показатели эффективности по иерархии сверху вниз – от главной цели предприятия до целей подразделений и функционалов [12].

При отборе KPI для ОАО «ММК-МЕТИЗ» нужно учитывать, что в большинстве случаев не возникает проблем при составлении списка возможных KPI, поскольку менеджерам хорошо известны параметры, по которым возможна оценка деятельности подразделений, однако проблемами сопровождается отбор ключевых, самых значимых показателей эффективности.

При разработке системы предлагается взять за основу структуру показателей эффективности деятельности, состоящую из трех уровней:

- ключевые показатели результативности;
- производственные показатели;
- ключевые показатели эффективности [12].

Ключевые показатели результативности, выбранные для ОАО «ММК-МЕТИЗ», описаны в табл. 1.

Таблица 1. Ключевые показатели результативности для ОАО «ММК-МЕТИЗ»

Table 1. Key performance indicators for OJSC MMK-METIZ

Показатели	Описание	Расчет
EBITDA	<i>Earnings Before Interest, Taxes, Depreciation and Amortization.</i> Чистая прибыль с учетом процентов, налогов, износа и амортизации. Показатель EBITDA можно использовать для отслеживания и сравнения базовой прибыльности компаний независимо от их предположений об амортизации или выбора финансирования	EBITDA рассчитывается путем добавления процентных, налоговых, амортизационных расходов к чистой прибыли
EVA	<i>Economic Value Added.</i> Показатель экономической прибыли предприятия после выплаты всех налогов и платы за весь инвестированный в предприятие капитал	$EVA = NOPAT - WACC \times CE$
ROE	<i>Return on Equity.</i> Рентабельность собственного капитала показывает отдачу на инвестиции акционеров с точки зрения учетной прибыли	$ROE = \text{Чистая прибыль} / \text{Собственный капитал} \times 100 \%$
ROS	<i>Return on Sales.</i> Рентабельность продаж показывает долю прибыли в каждом заработанном рубле	$ROS = \text{Операционная прибыль} / \text{Объем продаж}$

Показатель EBITDA является полезным инструментом для сравнения компаний, в отношении которых применяются разные налоговые режимы и капитальные затраты, или для их анализа в ситуациях, когда они могут измениться. В нем также не учитываются неденежные амортизационные отчисления, которые могут неточно отражать будущие потребности в капитальных затратах. В то же время исключение одних затрат при включении других может дать почву для злоупотреблений этим показателем со стороны недобросовестных корпоративных менеджеров. Лучшая защита от такой практики – сверять отчетную EBITDA с чистой прибылью. Стратегическим ориентиром Общества является обеспечение роста стоимости бизнеса. Для этого необходимы мероприятия по увеличению добавленной стоимости производимой продукции. Оценивать стоимость организации предлагается показателем экономической добавленной стоимости – Economic Value Added (EVA).

Таким образом, измерение степени достижения поставленной цели в виде стоимости показателя EVA имеет ряд сильных сторон:

- оценивает деятельность предприятия, которая наиболее точно выражает фактическую

прибыльность, так как оценка стоимости предприятия осуществляется в первую очередь на основе не данных бухгалтерского учета, а результатов экономической деятельности, формируемых на уровне структурных подразделений предприятия;

- оценивает эффективность управленческих решений в соответствии с поставленными целями, качество стратегического планирования;

- система вознаграждения на основе показателя EVA позволяет объединять интересы менеджеров и собственников;

- система управления и вознаграждения на основе показателя EVA ведет к улучшению корпоративной культуры.

Производственные показатели, выбранные для ОАО «ММК-МЕТИЗ», описаны в табл. 2.

Группа бюджетного планирования и управления оборотными активами является подразделением управления финансов и экономики. Данная группа была создана с целью экономического и финансового планирования и нормирования оборотных активов, направленных на эффективное использование всех видов ресурсов в процессе производства и реализации продукции.

Таблица 2. Производственные показатели для ОАО «ММК-МЕТИЗ»
Table 2. Production performance for OJSC MMK-METIZ

Стратегическая цель	Показатели	Описание
Производство продукции, соответствующей современным и перспективным требованиям потребителей. Улучшение качества выпускаемой продукции	Затраты на производство продукции	Обеспечение выполнения бюджета производства товарной продукции не менее установленного предела
	Затраты на ремонт	Обеспечение выполнения плановых мероприятий по техническому обслуживанию и ремонтам не менее установленного предела
Развитие существующих и освоение новых рынков сбыта металлоизделий	Объем реализации	Обеспечение достижения выполнения принятых заказов на отгрузку металлопродукции на внутренний и внешний рынки не менее установленного предела
	Структура продаж	Обеспечение повышения реализации продукции с высокой добавленной стоимостью на определенный процент
Повышение эффективности производства и снижение производственных затрат. Концентрация производственных ресурсов и оптимальное их использование. Увеличение доли продукции с большей добавленной стоимостью	Себестоимость продукции Производительность труда	Обеспечение снижения себестоимости продукции на установленный процент Обеспечение производительности труда не менее установленного предела

Основными задачами группы являются:

- экономическое и финансовое планирование и нормирование оборотных активов с целью их эффективного использования;
- анализ экономического и финансового состояния Общества;
- организация и методическое обеспечение разработок, перспективных и краткосрочных прогнозов экономического развития Общества;
- обеспечение информационными и аналитическими материалами руководителей Общества для принятия перспективных и оперативных решений по управлению финансовыми результатами;
- обеспечение результативности и эффективного функционирования системы менеджмента качества в рамках группы.

Деятельность группы основывается на следующих бизнес-процессах:

- бизнес-процесс «Бюджетное планирование и управление оборотными активами в части управления дебиторской и кредиторской задолженностями»;
- бизнес-процесс «Бюджетное планирование и управление оборотными активами в части управления запасами»;
- бизнес-процесс «Бюджетное планирование и управление оборотными активами в части бюджетного планирования и анализа».

Проанализировав данные бизнес-процессы, были определены ключевые показатели эффективности для группы бюджетного планирования и управления обратными активами (табл. 3).

Таблица 3. Ключевые показатели эффективности для группы бюджетного планирования и управления оборотными активами

Table 3. Key performance indicators for the Group of Budget Planning and Current Assets Management

Показатели	Описание
Общий показатель премирования для группы:	
Gross Margin Percentage (GMP). Процент валовой прибыли	Валовая прибыль представляет собой процент от общей выручки, оставшейся у компании сверх затрат, непосредственно связанных с производством и распределением. Процентный показатель рассчитывается путем вычитания этих затрат из общего показателя выручки, а затем деления этой суммы на общий показатель выручки
Показатели премирования работников, осуществляющих бизнес-процесс «Бюджетное планирование и управление оборотными активами в части управления дебиторской и кредиторской задолженностями»:	
Receivable Turnover (RT). Коэффициент оборачиваемости дебиторской задолженности	Коэффициент оборачиваемости дебиторской задолженности измеряет эффективность, с которой компания может получить средства по своей дебиторской задолженности или кредиту, предоставляемому клиентам. Этот коэффициент также измеряет, сколько раз дебиторская задолженность компании конвертируется в денежные средства за определенный период времени. Коэффициент оборачиваемости дебиторской задолженности рассчитывается на ежегодной, ежеквартальной или ежемесячной основе
Accounts Payable Turnover Ratio (APTR). Коэффициент кредиторской задолженности	Коэффициент оборачиваемости кредиторской задолженности – это показатель краткосрочной ликвидности, используемый для количественной оценки скорости, с которой компания расплачивается со своими поставщиками. Оборот кредиторской задолженности показывает, сколько раз компания погашает свою кредиторскую задолженность в течение определенного периода
Показатели премирования работников, осуществляющих бизнес-процесс «Бюджетное планирование и управление оборотными активами в части управления запасами»:	
Stock Turnover (ST). Коэффициент оборачиваемости материально-производственных запасов	Оборачиваемость запасов – это коэффициент эффективности, который помогает определить, насколько хорошо компания управляет своими запасами при одновременном генерировании продаж в течение определенного периода времени. Знание этого показателя имеет большое значение, поскольку оно помогает контролировать риски, связанные с плохим управлением запасами
Показатели премирования работников, осуществляющих бизнес-процесс «Бюджетное планирование и управление оборотными активами в части бюджетного планирования и анализа»:	
Процент точности выполнения бюджета	Фиксированное значение показателя
Количество (процент) ошибок в управленческой отчетности	Фиксированное значение показателя

Заключение

В процессе исследования была проанализирована система управления одного из крупнейших специализированных предприятий по глубокой переработке металлопроката ОАО «ММК-МЕТИЗ» и выявлены основные недостатки существующей системы, а именно:

- сложность системы бюджетирования;
- отсутствие гибкости;
- отсутствие мотивации персонала;
- противоречия между достижением целей и их стимулирующим эффектом.

Основным недостатком системы бюджетирования в ОАО «ММК-МЕТИЗ» является отсутствие взаимосвязи стратегических целей предприятия, его структурных подразделений с операционной деятельностью и отсутствие взаимосвязи бюджетов с показателями премирования конкретных работников. Наиболее эффективным методом решения данных проблем является внедрение на предприятии системы Key Performance Indicators (KPI). Исследование показало, что ключевые показатели эффективности предлагают эффективный способ измерения и отслеживания эффективности компании по множеству различных показателей. Внедрение системы KPI даст группе бюджетного планирования и управления оборотными активами ОАО «ММК-МЕТИЗ» возможность перевести концепцию и стратегию компании в плоскость понятных и выполнимых задач для работников всех структурных подразделений, что будет способствовать оптимизации усилий. Стратегическое планирование и составление годового бюджета будут взаимозависимыми процессами. Мониторинг деятельности предприятия сведется не только к анализу отклонений показателей хозяйственной деятельности от плановых, но и к оценке текущих результатов достижения стратегических целей. При разработке бюджетов внимание будет фокусироваться не только на выполнении финансового бюджета, но и на достижении долговременных стратегических целей. Система KPI позволит мотивировать персонал на повышение эффективности деятельности в целом.

Список источников

1. Федоров И.В., Кузнецова Н.В. Поиск наиболее эффективных решений организационных изменений на металлургических предприятиях // Современная модель управления: проблемы и перспективы: материалы III Всероссийской научно-практической конференции. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2019. С. 77-82.
2. Система внутреннего контроля в корпорациях

черной металлургии: проблемы и перспективы развития / Колокольцев В.М., Козлова Т.В., Замбрицкая Е.С., Вдовин К.Н. // Черные металлы. 2019. № 12 (1056). С. 16-21.

3. Пономарева О.С., Дуденков С.В. Бюджетирование управленческих решений // Современная модель управления: проблемы и перспективы: материалы III Всероссийской научно-практической конференции. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2019. С. 108-111.
4. Балынская Н.Р., Коптякова С.В., Майорова Т.В. Аттестация персонала как инструмент повышения эффективности использования трудового потенциала на предприятиях обрабатывающей отрасли // Вопросы управления. 2019. № 6. С. 209-222.
5. Литовская Ю.В., Макоткина Д.В. Управление затратами металлургического предприятия с помощью метода бюджетирования // Современная модель управления: проблемы и перспективы: материалы III Всероссийской научно-практической конференции. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2019. С. 64-67.
6. Совершенствование системы управления затратами на промышленном предприятии / Пономарева О.С., Майорова Т.В., Махоткина Е.С., Шубина М.В. // Экономика и предпринимательство. 2022. № 1 (138). С. 674-677.
7. Панов М.М. Оценка деятельности и система управления компанией на основе KPI. М.: Инфра-М, 2013.
8. Пол Р. Нивен. Сбалансированная система показателей: Шаг за шагом: максимальное повышение эффективности и закрепление полученных результатов / пер. с англ. Днепропетровск: Баланс Бизнес Букс, 2004. 328 с.
9. Балашов В.Н. KPI как инструмент результативной и эффективной деятельности // Виттевские чтения. 2014. №1. С. 274-276.
10. Пономарева О.С., Симаков Д.В., Терентьева Ю.Г. Тенденции развития и структура российского рынка метизной продукции // Перспективы науки. 2016. № 12 (87). С. 23-26.
11. Чукин В.В., Артюхин В.И., Рубин Г.Ш. Проблема повышения качества крепежных изделий // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, 2007. № 4 (20). С. 99-102.
12. Симаков Д.Б., Портнова В.А. Управление промышленным предприятием путем применения системы KPI // Современный менеджмент: теория и практика: материалы всероссийской научно-практической конференции / под общ. ред. Н.В. Кузнецовой. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2016. С. 51-54.

References

1. Fedorov I.V., Kuznetsova N.V. Seeking for the most efficient solutions to organizational changes at metallurgical enterprises. A modern management model:

- problems and prospects. Proceedings of the 3rd All-Russian Scientific and Practical Conference. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University; 2019;77-82. (In Russ.)
2. Kolokoltsev V.M., Kozlova T.V., Zambrzhitskaya E.S., Vdovin K.N. The internal control system applied in ferrous metallurgy corporations: problems and prospects of development. *Chernye metally* [Ferrous Metals]. 2019;(12(1056)):16-21. (In Russ.)
3. Ponomareva O.S., Dudenkov S.V. Budgeting of management decisions. A modern management model: problems and prospects. Proceedings of the 3rd All-Russian Scientific and Practical Conference. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University; 2019;108-111. (In Russ.)
4. Balynskaya N.R., Koptyakova S.V., Maiorova T.V. Personnel certification as a tool to increase efficiency of using labor potential at manufacturing enterprises. *Voprosy upravleniya* [Management Issues]. 2019;(6):209-222. (In Russ.)
5. Litovskaya Yu.V., Makotkina D.V. Cost management of a metallurgical enterprise using the budgeting method. Proceedings of the 3rd All-Russian Scientific and Practical Conference. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University; 2019;64-67. (In Russ.)
6. Ponomareva O.S., Mayorova T.V., Makhotkina E.S., Shubina M.V. Improving the cost management system at an industrial enterprise. *Ekonomika i predprinimatelstvo* [Economics and Entrepreneurship]. 2022;(1(138)):674-677. (In Russ.)
7. Panov M.M. *Otsenka deyatelnosti i sistema upravleniya kompaniy na osnove KPI* [Performance assessment and the company management system based on KPI]. Moscow: Infra-M; 2013. (In Russ.)
8. Paul R. Niven. *Sbalansirovannaya sistema pokazateley: Shag za shagom: maksimalnoe povyshenie effektivnosti i zatreplenie poluchennykh rezultatov* [Balanced Scorecard step-by-step: maximizing performance and maintaining results]. Dnepropetrovsk: Balance Business Books; 2004. 328 p. (In Russ.)
9. Balashov V.N. KPI as a tool of effective and efficient activities. *Vittevskie chteniya* [Witte Readings]. 2014;(1):274-276. (In Russ.)
10. Ponomareva O.S., Simakov D.V., Terenteva Yu.G. Development trends and the structure of the Russian metalware market. *Perspektivy nauki* [Prospects of Science]. 2016;(12(87)):23-26. (In Russ.)
11. Chukin V.V., Artyukhin V.I., Rubin G.Sh. The problem of improving the quality of fasteners. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2007;(4(20)):99-102. (In Russ.)
12. Simakov D.B., Portnova V.A. Management of an industrial enterprise by applying the KPI system. Modern Management: Theory and Practice: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University; 2016;51-54. (In Russ.)

Поступила 09.11.2022; принята к публикации 14.02.2023; опубликована 27.03.2023
Submitted 09/11/2022; revised 14/02/2023; published 27/03/2023

Пономарева Ольга Станиславовна – кандидат педагогических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: slava_5@inbox.ru. ORCID 0000-0003-2274-2964

Майорова Татьяна Владимировна – кандидат экономических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: mvtv_2010@rambler.ru. ORCID 0000-0002-5137-6425

Приймак Валентина Андреевна – ведущий экономист, Управление финансов и экономики,
Группа бюджетного планирования и управления оборотными активами, ОАО «ММК-МЕТИЗ»,
Магнитогорск, Россия. Email: vaportnova93@mail.ru.

Olga S. Ponomareva – PhD (Pedagogy), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: slava_5@inbox.ru. ORCID 0000-0003-2274-2964

Tatyana V. Maiorova – PhD (Economics), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: mvtv_2010@rambler.ru. ORCID 0000-0002-5137-6425

Valentina A. Priymak – Lead Economist, Finance and Economics Department, Budget Planning
and Current Assets Management Group, OJSC MMK-METIZ, Magnitogorsk, Russia.
Email: vaportnova93@mail.ru.

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 005.72
DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-1-126-133



ПОКАЗАТЕЛИ ИННОВАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ГОТОВНОСТИ ОРГАНИЗАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ К ПРОВЕДЕНИЮ ИЗМЕНЕНИЙ

Назаревич С.А.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В статье представлено исследование проблем, связанных с внедрением новых технологий, технологических инноваций и других новых продуктов в деятельность организационных систем, инфраструктуры организации и производственных систем. Данные, представленные службой статистики и глобальным инновационным индексом, позволяют выдвинуть гипотезу о влиянии уровня развития экономики в регионе на количество инноваций, которые могут появляться на выходе организационных систем. Подтверждением гипотезы являются результаты анализа вторичной информации, характеризующей общую экономическую обстановку относительно затрат на развитие технологических инноваций, и количество персонала, который осуществляет свои профессиональные трудовые функции в сфере инновационной деятельности. Проанализированы поведенческие факторы, оказывающие влияние на восприятие новых технологий, которые могут быть использованы в качестве новых платформ для создания деятельности внутри организационной системы, а также учтены риски, возможные при реализации неподготовленных изменений. Для оценки уровня готовности организационной системы разработан и представлен перечень показателей инновационного поведения для организационной системы в сравнении с этапами поведенческой теории А. Маслоу. Показатели инновационного поведения могут быть использованы в рамках мониторинга уровня зрелости организационной системы с целью допущения возможности о достаточности потенциала системы к восприятию нововведений с минимальными организационными издержками. На базе представленных показателей, характеризующих взаимосвязь показателей инновационного поведения и поведенческих факторов, разработан методический инструмент, основанный на классическом инструменте Всеобщего управления качеством (Total Quality Management, TQM), используемом для итерационного контроля новых и стабильных процессов – цикл Деминга-Шухарта. В материалах статьи представлен фрагмент протокола. Совокупное применение разработанных моделей и представленной методики позволит итеративно контролировать готовность организационной системы к проведению технологических изменений и оценить показатели инновационного поведения с целью максимальной подготовки персонала организационной системы к возможным структурным изменениям.

Ключевые слова: организационная система, инновационное поведение, уровень зрелости, качество, поведенческие модели, управление изменениями

© Назаревич С.А., 2023

Для цитирования

Назаревич С.А. Показатели инновационного поведения для мониторинга состояния готовности организационной системы к проведению изменений // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №1. С. 126-133. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-126-133>



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

INDICATORS OF INNOVATIVE BEHAVIOR USED TO MONITOR READINESS OF THE ORGANIZATIONAL SYSTEM FOR CHANGES

Nazarevich S.A.

Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia

Abstract. The article presents a study on the difficulties associated with the introduction of new technologies, technological innovations and other new products into the activities of organizational systems, organization infrastructure and production systems. The data presented by the statistics service and the global innovation index allow us to put forward a hypothesis about the influence of the level of economic development in the region on the amount of innovation that can appear at the output of organizational systems. The hypothesis is confirmed by the results of the analysis of secondary information characterizing the general economic situation regarding expenditure on developing technological innovations and the number of personnel carrying out their professional labor functions in the field of innovation. The author has analyzed behavioral factors influencing the perception of new technologies that can be used as new platforms for creating activities within the organizational system and also considered the risks possible in the implementation of unprepared changes. To assess the readiness of the organizational system, a list was developed to present the indicators of innovative behavior for the organizational system in comparison with the stages of A. Maslow's behavioral theory. The indicators of innovative behavior can be used as part of monitoring the level of maturity of the organizational system to assess sufficiency of the system's potential to perceive innovations with minimum organizational costs. The presented indicators that characterize the relations between the indicators of innovative behavior and behavioral factors served as a basis for a methodological tool based on the classic tool of Total Quality Management (TQM) used for iterative control of new and stable processes, namely the Deming-Shewhart cycle. The article presents a part of the protocol. A combined application of the developed models and the presented procedure will iteratively control the readiness of the organizational system to carry out technological changes and assess the indicators of innovative behavior to maximize the preparation of the personnel of the organizational system for potential structural changes.

Keywords: organizational system, innovative behavior, maturity level, quality, behavioral models, change management

For citation

Nazarevich S.A. Indicators of Innovative Behavior Used to Monitor Readiness of the Organizational System for Changes. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 1, pp. 126-133. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-126-133>

Введение

Исследование этапов эволюции организационных систем можно осуществлять через процессы мониторинга и анализа потенциала структур и отделов предприятий, связанных между собой реализацией основного процесса. Уровни зрелости процессов, входящих в общую компетентность структурного подразделения, отражают готовность профессионального сообщества реализовать необходимые изменения в ценностных процессах. Верификация готовности осуществляется с помощью рейтинговых данных, представленных в [1]. Используя готовую интерпретацию, можно создать механизм для внутреннего мониторинга уровня зрелости процессов. Развитие программ национальной цифровой трансформации требует нового взгляда для участия персонала в процессах управления изменениями, поэтому вопросы подготовки профессиональных сообществ к изменениям, как в управлении, так и в диспетчеризации основных процессов, создающих ценность в про-

изводстве основного валового продукта организации и оказания сервисных процессов на эксплуатационных этапах жизненного цикла, носят приоритетный и актуальный характер.

Настоящие процессы цифровой трансформации, происходящие в машиностроительной отрасли, требуют информационной готовности к изменениям от административно-управленческого аппарата и профессионального сообщества, поэтому так необходим и крайне востребован механизм измерения и анализа признаков инновационного поведения в организационной системе.

Материалы и методы исследования

Проблемы поперiodного сохранения и передачи знаний в организационных системах являются серьезным вызовом для современных машиностроительных и приборостроительных организаций, желающих успешно функционировать в настоящих рыночных условиях, поэтому проблемы организационного забывания [2], которые достаточно хорошо описаны исследовате-

лями в [3-7], предлагают условия, в результате которых организационная система приходит к нескольким стадиям: резкое технологическое ускорение отрасли как результат деградации существующих технологий организационной системы, переход к модификационным моделям, обладающим потенциалом, для горизонтальной диверсификации, либо инициирование итеративных аудитов для обнаружения внутреннего барьера в развитии организационной системы, послужившего предпосылкой к неэффективности освоения новых технологий, что отражается на мотивации персонала и способности к восприятию необходимых изменений.

Следовательно, для успешного проведения изменений в процессах организационной системы, создающих основной валовой продукт, необходимо итерационно измерять потенциал персонала с помощью идентификаторов – признаков инновационного поведения, так как подобные меры позволят выявить более лояльные к проведению изменений кадров.

Успешность в создании и реализации базисных и улучшающих инноваций во многом зависит от состояния технологической инфраструктуры и экономики знаний в исследуемом регионе. Многими исследователями уже была подтверждена данная гипотеза [8-11]. Обратимся к результатам исследований, представленных в Глобальном ин-

новационном индексе (ГИИ) 2021 года, которые отражают прямую зависимость между инновациями и развитием экономики. Следовательно, чем выше темпы развития экономической инфраструктуры и технологической экосистемы, тем масштабнее подход к созданию инноваций. В рейтинге, предоставленном Глобальным инновационным индексом Всемирной организации интеллектуальной собственности 2021 года, Европа по-прежнему остается вторым самым инновационным регионом в мире. Здесь находится большое количество инновационных экономик: 16 европейских экономик являются инновационными лидерами (топ 25). В общей сложности 10 стран поднялись в этом рейтинге: Франция (11), Исландия (17), Австрия (18), Эстония (21), Венгрия (34), Болгария (35), Словакия (37), Литва (39), Российская Федерация (45) и Беларусь (62) [7].

Теперь обратимся к предпосылкам. По визуализированным данным [13] Федеральной службы государственной статистики, представленным на **рис. 1**, наблюдается существенный рост затрат на технологические инновации в течение десяти лет. Учитывая колебания индекса инфляции, можно сделать вывод о возможности появления базисных и улучшающих инноваций в рамках следующих десяти лет на горизонте планирования целей и результатов инновационной деятельности.

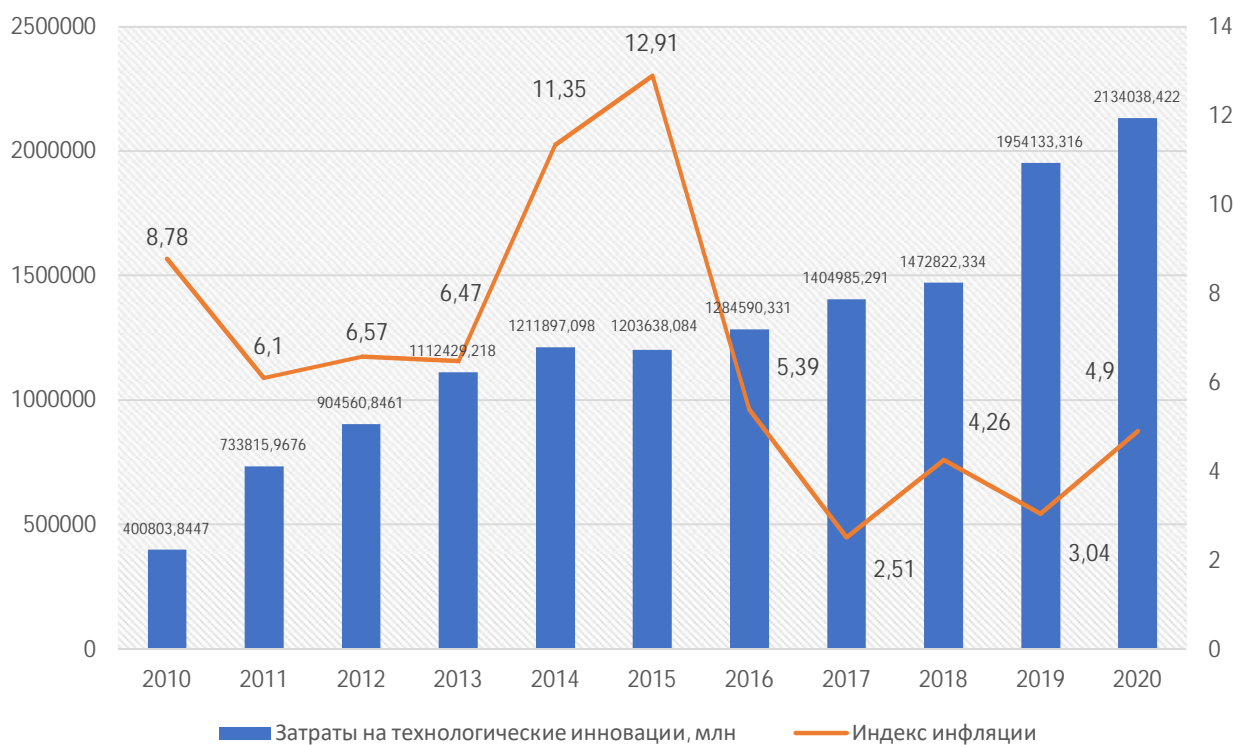


Рис. 1. Расходы на инновационную деятельность и индекс инфляции [13]

Fig. 1. Expenditure on innovation activities and the inflation index [13]

Инновационная деятельность поддерживается не только расходами на исследования и прикладные разработки, а также действующими кадрами и научными школами. И такой признак, как инновационное поведение персонала, служит индикатором для проведения изменений и технологического ускорения.

Инновационное поведение – это достаточно сложно структурируемая деятельность, которая в своей основе подразумевает высокую корреляцию с основными макроэкономическими показателями, и подобная связь обуславливается социцифровым развитием профессионального сообщества и уровнем качества жизни специалистов, в сферу ответственности которых входит креативное техническое творчество либо технологическое предпринимательство. Тем самым вторично подтверждается вышеупомянутая гипотеза о причастности развития экономики к количеству инновационных решений.

На **рис. 2** представлены результаты проведённого исследования, где демонстрируется устойчивый спад численности персонала, в сферу ответственности которого входят исследования, однако после 2018 года наблюдается стабилизация ситуации и намечается положительная тенденция при соответственном росте затрат на

технологические инновации. В целом анализ по нескольким индикаторам позволяет визуализировать положительную динамику в росте численности персонала, и при достижении консенсуальных условий в процессах развертывания инновационной деятельности могут возникнуть предпосылки для появления новых технологий и улучшающих инноваций.

Результаты исследования и их обсуждение

Для создания предпосылок к развёртыванию процессов инновационной деятельности необходимо провести анализ и сформировать вывод, существует ли в исследуемом структурном подразделении признаки инновационного поведения. Самый распространённый способ провести подобные исследования – это запустить процесс анкетирования, в котором будет предложено некоторое количество открытых и закрытых вопросов, характеризующих поведенческую модель персонала. Однако проведение анкетирования нивелирует реальные показатели и достаточно размыто отображает существующее состояние в структурном подразделении. Все это может привести к формированию ложного суждения о готовности подразделения к интеграции новых технологий или изменений.

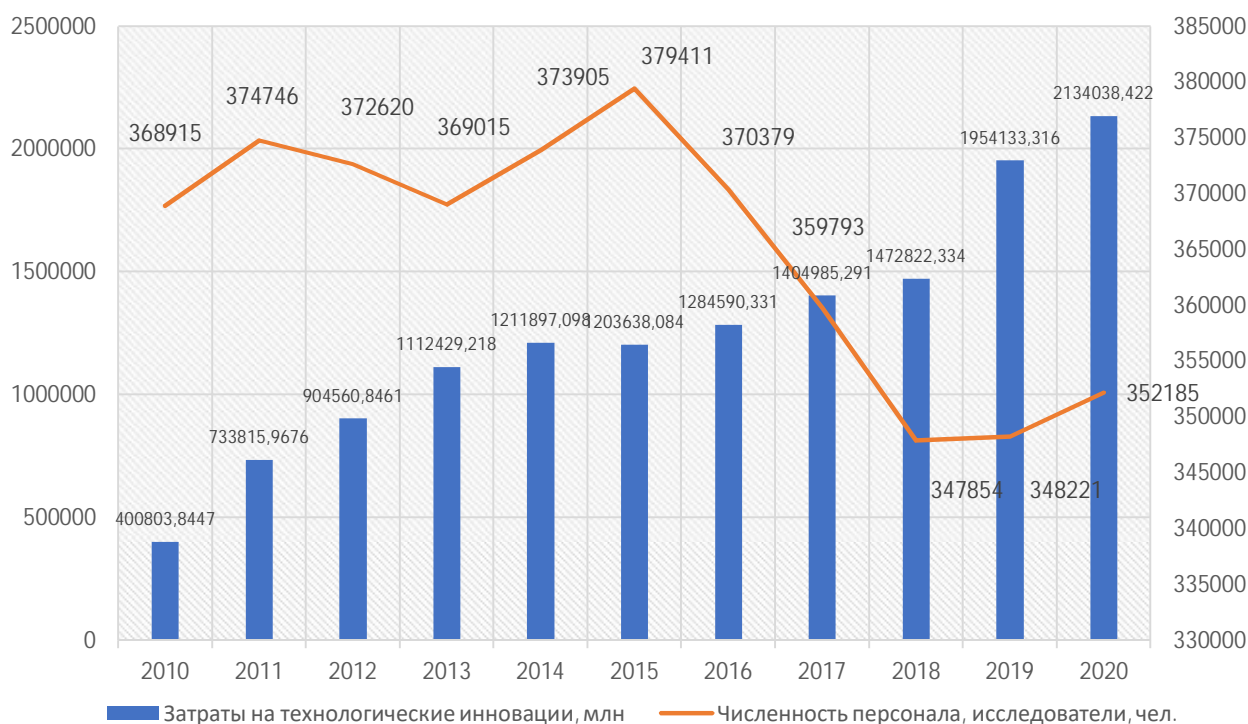


Рис. 2. Расходы на инновационную деятельность и численность персонала [13]

Fig. 2. Expenditure on innovation activities and staff headcount [13]

Таким образом, для анализа признаков инновационного поведения необходимо собрать набор показателей на основе результатов опросов респондентов, находящихся на первых этапах жизненного цикла развертывания инновационной деятельности и характеризующих свое состояние пропорцией поведенческих факторов и суждений относительно своей роли и функции в новом процессе, в случае если процесс интеграции уже запущен или только планируется к развертыванию.

Сформированный набор показателей характеризуется выявленными поведенческими факторами (табл. 1), которые базируются на определенных уровнях классической концепции

А. Маслоу, выражающей мотивации и потребности, необходимые специалистам для успешной собственной реализации. Показатели инновационного поведения схожи с системой оценки инновационного потенциала организации и в данном случае по этому поводу существует множество источников, описывающих исследования инновационного потенциала организации [13-16]. Стоит отметить, что традиционными составляющими для исследования способности организации к восприятию нововведений является детальный анализ укрупнённых модулей, отображающих потенциал организационных подразделений или корпоративную этику управления.

Таблица 1. Взаимосвязь показателей инновационного поведения и поведенческих факторов
Table 1. Correlation between indicators of innovative behavior and behavioral factors

Показатели инновационного поведения	Поведенческие факторы [15, 16]	Уровни Маслоу
Количество процессов по реализации структурных изменений	Осознание недостаточности достигнутых результатов и желание их улучшить	Познавательные потребности
Количество развивающих сессий и семинаров	Потребность в контактах с интересными, творческими людьми	Социальные потребности
Количество мероприятий для развития организации	Карьерные амбиции, выполнение требований контракта	Потребности в безопасности
Количество новаций, предложенных без объявления проблемы в процессе	Потребность в новизне, смене обстановки, преодолении рутины	Познавательные потребности
Количество самостоятельных исследований по проблеме в процессе	Потребность в поиске, исследовании, лучшем понимании закономерностей	Познавательные потребности
Количество инициатив, предложенных для решения текущих проблем	Потребность в самовыражении, самосовершенствовании	Потребность в самоактуализации
Количество процессов, делегируемых для развертывания инновационного процесса	Осознание готовности участвовать в инновационных процессах, уверенность в себе	Потребность в самоактуализации
Количество рационализаций, доведенных до практической результативности	Желание проверить на практике полученные знания о новшествах	Познавательные потребности
Количество инициативных проектов, предложенных для реализации	Стремление быть замеченным и по достоинству оцененным	Потребность в признании
Количество инициативных проектов инноватора, доведенных до стадии практической результативности	Потребность в лидерстве	Потребность в признании
Количество амбициозных проектов с риском для деловой репутации	Потребность в риске	Потребность в самоактуализации
Количество мероприятий-семинаров по инновационной деятельности	Слабая информированность коллектива о возможных инновациях	Потребность в социализации
Количество новых практических инструментов для повышения эффективности работы	Убеждение, что эффективно работать можно и по-старому	Потребность в безопасности
Количество консультаций по страхованию рисков в области развертывания новых процессов	Чувство страха перед новым, отрицательными результатами	Потребность в безопасности
Количество консультаций со спикерами и модераторами процесса	Отсутствие помощи	Потребность в безопасности
Количество совместных проектов, реализуемых структурным подразделением	Разногласия, конфликты в коллективе	Потребность в безопасности

Для более детального рассмотрения инновационного поведения структурного подразделения можно включить набор представленных в **табл. 1** показателей для проведения итерационного мониторинга состояния готовности организационной системы к реализации технологических изменений. И для достижения подобных целей возможно использовать классический инструментарий, который широко применяется для подобных задач, а именно в новой интерпретации с итеративным механистическим заполнением определённой формы, представленной в **табл. 2**, что позволит методически измерять результативность запланированных мероприятий. Основой подобной методики исследования инновационного поведения является итеративная последовательность, выполняемая по циклу Деминга-Шухарта.

Таблица 2. Фрагмент протокола выполнения цикла Деминга-Шухарта

Table 2. A part of the protocol of execution of the Deming-Shewhart cycle

Этап цикла	Процесс (Деятельность)	Метод измерения	Критерий
...

Методика заключается в последовательном проведении двух этапов:

1) анализ основных показателей общей инициативности и надёжности структурного подразделения, где необходимо использовать показатели организационно-технологической надёжности [17];

2) экстремальное тестирование путем решения форсайт-кейса: готово ли ваше подразделение к инновациям и другим оперативным задачам, выходящим за рамки компетентности.

Заключение

Разработанный набор показателей и его взаимосвязь с поведенческими факторами, соответствующими определённому уровню пирамиды потребностей А. Маслоу, может быть использован как механизм для мониторинга состояния готовности организационной системы к проведению изменений. Сочетание с рекомендациями, приведёнными в ГОСТ Р ИСО/МЭК 15504-2-2009 «Информационная технология», содержащими рейтинговые значения для оценки уровня зрелости процессов, включая протокол цикла Деминга-Шухарта, в котором устанавливаются критерии и методы измерения, представит собой мощный инструмент для проведения предварительного анализа инновационного поведения в

ситуациях поддержки принятия решения о проведении изменений или реализации организационных инноваций.

Список источников

1. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15504-2-2009. Информационная технология (ИТ). Оценка процесса. Ч. 2. Проведение оценки. М.: Стандартинформ, 2018. 20 с.
2. Благов Е.Ю., Щербан С.А. Управление организационным забыванием: на примере российских машиностроительных компаний // Вестник Санкт-Петербургского университета. Менеджмент. 2019. Т. 18. №2. С. 261-287. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-organizatsionnym-zabyvaniem-na-primere-rossiyskih-mashinostroitelnyh-kompaniy> (дата обращения: 31.05.2022).
3. Beregova G. Philosophy of education: Pragmatism-instrumentalism concept of forming the future human in higher education. *Future Human Image*. 2016, vol. 3, no. 6, pp. 31-45.
4. Kluge A. & Gronau N. Intentional Forgetting in Organizations: The Importance of Eliminating Retrieval Cues for Implementing New Routines. *Frontiers in Psychology*. 2018, vol. 9. 10.3389/fpsyg.2018.00051. URL: https://www.researchgate.net/publication/322853142_Intentional_Forgetting_in_Organizations_The_Importance_of_Eliminating_Retrieval_Cues_for_Implementing_New_Routines (дата обращения: 07.06.2022)
5. Благов Е.Ю., Плешкова А.Ю. Барьеры к обмену знаниями в административных подразделениях высших учебных заведений // Креативная экономика. 2017. Т. 11. №3. С. 285-302.
6. Blagov E., Pleshkova A., Soldatkin E., Koritckiy N. Knowledge sharing barriers in the educational program management administrative processes: A case of a Bachelor program in a Russian university // *Electronic Journal of Knowledge Management*. 2017, vol. 15, no. 2, pp. 113-125.
7. Глобальный инновационный индекс 2021 [Электронный ресурс]. 14-е изд. URL: <https://www.wipo.int/publications/ru/details.jsp?id=4560> (дата обращения 25.05.22)
8. Никонова Я.И. Исследование взаимосвязи инноваций и экономического роста национальных экономик // Научно-методический электронный журнал «Концепт». 2016. Т. 15. С. 2001-2005. URL: <http://e-koncept.ru/2016/96319.htm>.
9. Ухина А.В., Агафонова М.С., Половинкин И.С. Инвестиционно-инновационные факторы экономического роста // Научное обозрение. Экономические науки. 2016. №2. С. 197-199. URL: <https://science-economy.ru/ru/article/view?id=809> (дата обращения: 07.06.2022)
10. Винниченко А.В. Дрейфующие модели оценки потенциала технологических систем и базовых процессов // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем: сб. докл.

- Третьей Всероссийской научной конференции. Санкт-Петербург, 2022. С. 124-128.
11. Ельцов А.А. Методика оценки инновационных проектов в радиоэлектронной промышленности // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тезисы докладов Двадцать седьмой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. М., 2021. С. 563.
 12. Линьков А.Д. Алгоритм проведения экспертизы потенциально инновационной импортозамещающей продукции крупных проектов // Горизонты экономики. 2022. №2 (68). С. 31-37.
 13. Федеральная служба государственной статистики (Росстат) [Электронный ресурс]. URL: <https://rosstat.gov.ru/> (дата обращения: 08.06.2022)
 14. Батьковский А.М., Кравчук П.В., Фомина А.В. Организационные инновации на предприятиях радиоэлектронной промышленности // International Journal of Professional Science. 2020. № 2. С. 36-43.
 15. Трапицына Г.Н., Трапицын С.Ю. Детерминанты инновационного поведения педагогов // Проблемы современного педагогического образования. 2018. № 60-3. С. 320-325. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/determinanty-innovatsionnogo-povedeniya-pedagogov> (дата обращения: 08.06.2022).
 16. Калабина Е.Г., Берестовой А.С. Факторы инновационного поведения работника промышленного предприятия // Вестник ЧелГУ. 2017. №10 (406). С. 139-146. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/factory-innovatsionnogo-povedeniya-rabotnika-promyshlennogo-predpriyatiya> (дата обращения: 08.06.2022)
 17. Назаревич С.А. Бихевиористические модели организационно-технологической надежности // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем: сб. докл. Второй Всероссийской научной конференции. Санкт-Петербург, 2021. С. 143-145.
- References**
1. GOST R ISO/IEC 15504-2-2009. Information technology (IT). Process assessment. Part 2. Assessment procedure. Moscow: Standartinform; 2018. 20 p. (In Russ.)
 2. Blagov E.Yu., Shcherban S.A. Management of organizational forgetting: Using Russian mechanical engineering companies as an example. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Menedzhment* [Bulletin of Saint Petersburg University. Management]. 2019;18(2):261-287. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-organizatsionnym-zabyvaniem-na-primere-rossiyskih-mashinostroitelnyh-kompaniy> (Accessed on May 31, 2022). (In Russ.)
 3. Beregova G. Philosophy of education: Pragmatism-instrumentalism concept of forming the future human in higher education. *Future Human Image*. 2016;3(6):31-45.
 4. Kluge A., Gronau N. Intentional forgetting in organizations: The importance of eliminating retrieval cues for implementing new routines. *Frontiers in Psychology*. 2018;9. 10.3389/fpsyg.2018.00051. URL: https://www.researchgate.net/publication/322853142_Intentional_Forgetting_in_Organizations_The_Importance_of_Eliminating_Retrieval_Cues_for_Implementing_New_Routines (Accessed on June 07, 2022)
 5. Blagov E.Yu., Pleshkova A.Yu. Barriers to knowledge sharing in administrative units of higher education institutions. *Kreativnaya ekonomika* [Creative Economy]. 2017;11(3):285-302. (In Russ.)
 6. Blagov E., Pleshkova A., Soldatkin E., Koritckiy N. Knowledge sharing barriers in the educational program management administrative processes: A case of a Bachelor program in a Russian university. *Electronic Journal of Knowledge Management*. 2017;15(2):113-125. (In Russ.)
 7. Global Innovation Index 2021, 14th edition. URL: <https://www.wipo.int/publications/ru/details.jsp?id=4560> (Accessed on May 25, 2022)
 8. Nikonova Ya.I. Study on the relationship between innovation and economic growth of national economies. *Nauchno-metodicheskii elektronnyi zhurnal «Kontsept»* [Scientific and Methodological Electronic Journal Concept]. 2016;15: 2001-2005. URL: <http://e-koncept.ru/2016/96319.htm>. (In Russ.)
 9. Ukhina A.V., Agafonova M.S., Polovinkin I.S. Investment and innovation factors of economic growth. *Nauchnoe obozrenie. Ekonomicheskie nauki* [Scientific Review. Economic Sciences]. 2016;(2):197-199. URL: <https://science-economy.ru/ru/article/view?id=809> (Accessed on June 07, 2022). (In Russ.)
 10. Vinnichenko A.V. Drifting models for assessing the potential of technological systems and basic processes. Modeling and situational quality control of complex systems. *Proceedings of the Third All-Russian Scientific Conference*. Saint Petersburg; 2022;124-128. (In Russ.)
 11. Eltsov A.A. Methodology for assessing innovative projects in the radio-electronic industry. *Radio electronics, electrical engineering and energy. Abstracts of the Twenty-Seventh International Scientific and Technical Conference of Students and Postgraduate Students*. Moscow; 2021;563. (In Russ.)
 12. Linkov A.D. Algorithm for examining potentially innovative import-substituting products of large projects. *Gorizonty ekonomiki* [Horizons of Economy]. 2022;(2(68)):31-37. (In Russ.)
 13. Federal State Statistics Service (Rosstat). URL: <https://rosstat.gov.ru/> (Accessed on June 08, 2022).
 14. Batkovsky A.M., Kravchuk P.V., Fomina A.V. Organizational innovations at the enterprises of the radio-electronic industry. *International Journal of Professional Science*. 2020;(2):36-43. (In Russ.)
 15. Trapitsyna G.N., Trapitsyn S.Yu. Determinants of innovative behavior of teachers. *Problemy sovremennogo pedagogicheskogo obrazovaniya* [Problems of modern pedagogical education]. 2018;(60-3): 320-325. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/determinanty-innovatsionnogo-povedeniya-pedagogov> (Accessed on June 08, 2022). (In Russ.)

16. Kalabina E.G., Berestovoy A.S. Factors of innovative behavior of an industrial enterprise employee. *Vestnik ChelGU* [Bulletin of Chelyabinsk State University]. 2017;(10(406)):139-146. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/factory-innovatsionnogo-povedeniya-rabotnika-promyshlennogo-predpriyatiya> (Accessed on June 08, 2022). (In Russ.)
17. Nazarevich S.A. Behavioristic models of organizational and technological reliability. Modeling and situational quality control of complex systems. Proceedings of the Second All-Russian Scientific Conference. Saint Petersburg; 2021;143-145. (In Russ.)

Поступила 06.02.2023; принята к публикации 20.02.2023; опубликована 27.03.2023
Submitted 06/02/2023; revised 20/02/2023; published 27/03/2023

Назаревич Станислав Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры инноватики и интегрированных систем качества, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия. Email: albus87@inbox.ru. ORCID 0000-0002-0665-8036

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

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: 10.18503/1995-2732-2023-21-1-134-141



ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНО-ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ КУЛЬТУРЫ В ПОДГОТОВКЕ СПЕЦИАЛИСТОВ ГОРНОГО ДЕЛА

Андреева О.В., Пыталев И.А., Шестопалов Е.В., Якшина В.В.

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

Аннотация. В настоящее время установлен практически стабильный ход выявления профессиональных заболеваний работников горнодобывающей промышленности, как у работников на открытых горных работах, так и у трудящихся в подземных условиях. Выполнен анализ научно-методической литературы по вопросам профессионально-прикладной физической культуры. Критически рассмотрены подходы к реализации задач профессионально-прикладной физической подготовки в образовательном процессе высших учебных заведений, готовящих специалистов для работы в различных сферах деятельности. Проанализирован нормативный материал, характеризующий требования к работодателю в части обеспечения предотвращения получения работником профессиональных заболеваний, связанных с вредностями, присутствующими при реализации трудового процесса в горнодобывающей промышленности. Выявлено значение рационального зонирования рабочего пространства с целью обеспечения комфортных условий трудового процесса в части функционирования сенсорных систем работника. Выявлено, что профессиональные заболевания приводят к преждевременному прекращению трудовой деятельности наиболее квалифицированных работников горной отрасли. Обосновано, что важная роль в снижении рисков профессиональных заболеваний принадлежит степени сопротивляемости организма работника воздействию неблагоприятных условий в процессе труда. Выявлено различие в возрасте работников, получивших профессиональные болезни при реализации трудовой деятельности на поверхности и на подземных работах. Предложен подход, позволяющий пролонгировать трудовую деятельность с обеспечением высококачественных результатов работника на основе специальной персонализированной физической подготовки. Разработана система профессионально-прикладной физической подготовки будущих специалистов горного дела, позволяющая обеспечить повышение качества жизни на длительный период. Приведен пример формирования программы реализации задач профессионально-прикладной физической подготовки в рамках учебной дисциплины «Элективные курсы по физической культуре».

Ключевые слова: физическая культура, профессионально-прикладная физическая культура, профессиональные заболевания, дыхательная система

© Андреева О.В., Пыталев И.А., Шестопалов Е.В., Якшина В.В., 2023

Для цитирования

Обоснование необходимости применения профессионально-прикладной физической культуры в подготовке специалистов горного дела / Андреева О.В., Пыталев И.А., Шестопалов Е.В., Якшина В.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №1. С. 134-141. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-134-141>



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

PROVIDING A RATIONALE FOR A NEED FOR OCCUPATION-SPECIFIC APPLIED PHYSICAL EDUCATION IN TRAINING OF MINING SPECIALISTS

Andreeva O.V., Pytalev I.A., Shestopalov E.V., Yakshina V.V.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Now, there is a quite constant procedure of identifying occupational diseases among both open pit mining workers and underground mining ones. The authors analyzed scientific and methodological literature on occupation-specific applied physical education and carefully studied approaches to fulfilling objectives of occupation-specific applied physical training in university teaching of specialists for various fields of activities. The authors analyzed the regulatory documents characterizing requirements for employers regarding prevention of occupational diseases caused by harmful factors in a working process in the mining industry. The article describes the value of a reasonable zoning of working space to ensure comfortable conditions of the working process for employees' sensor systems. It turned out that occupational diseases entail an early termination of the employment of the most qualified mining employees. The article contains a rationale for an important role of employees' resistance to adverse conditions of the working process in mitigating risks of occupational diseases. The authors identified a difference in the age of open pit mining and underground mining employees getting occupational diseases. The article describes a proposed approach applied to prolong the employment and ensure high quality employees' performance based in special person-focused physical training. The authors have developed a system of occupation-specific applied physical education for future mining specialists improving the quality of life for a long period. The article presents an example of preparing a program to achieve the objective of occupation-specific applied physical education as part of "Elective courses on physical education".

Keywords: physical education, occupation-specific applied physical education, occupational diseases, respiratory system

For citation

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, vol. 21, no. 1, pp. 134-141. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-134-141>

Горнодобывающая промышленность в период своего становления отличалась высокой степенью риска получения травм и профессиональных заболеваний. И даже сегодня трудовая деятельность в шахтах и на открытых горных работах связана с изменяющимися внешними условиями, с появлением сложностей в работе как собственно горнодобывающего оборудования, так и с влиянием «человеческого фактора» особенно в зонах повышенной опасности. В связи с этим на протяжении десятилетий была проведена большая работа по формированию нормативной базы, призванной существенно облегчить условия труда работников горной отрасли и снизить непроизводительные потери вследствие наступления заболеваний, травм и снижения производительности труда по причинам, связанным с качеством реализации работником трудовых процессов.

К числу нормативных актов, регулирующих производственные процессы и сохранность рабочей силы и трудовых резервов с горном деле, относятся следующие документы:

– Трудовой кодекс Российской Федерации (с изменениями на 31 июля 2020 года) (редакция, действующая с 13 августа 2020 года);

– Постановление Правительства Российской Федерации от 10.03.1999 № 263 (с изменениями на 25 октября 2019 года) «Об организации и осуществлении производственного контроля за соблюдением требований промышленной безопасности на опасном производственном объекте».

– Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых», утверждено приказом Ростехнадзора от 08.12.2020 № 505;

– Правила технической эксплуатации месторождений полезных ископаемых при разработке открытым способом (1981 год «Недра»);

– СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 «Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов» (с изменениями на 25 апреля 2014 года);

– Свод правил СП 37.13330.2012 «Промышленный транспорт». Актуализированная редакция СНиП 2.05.07-91* (утверждено приказом Министерства регионального развития РФ от 29 декабря 2011 года № 635/7);

– Федеральный закон от 04.05.2011 № 99-ФЗ «О лицензировании отдельных видов деятельности» (с изменениями на 31 июля 2020 года);

– Федеральный закон от 22.08.1995 № 151-ФЗ «Об аварийно-спасательных службах и статусе спасателей» (с изменениями на 3 июля 2019 года);

– Федеральный закон «О недрах» (в редакции Федерального закона от 3 марта 1995 года № 27-ФЗ) (с изменениями на 8 июня 2020 года);

– Федеральный закон «О специальной оценке условий труда» ФЗ-426;

– СП 34.13330.2012 «Автомобильные дороги». Актуализированная редакция СНиП 2.05.02-85* (с Изменением № 1, 2, 3, 4);

– Приказ Минтруда и социального развития России №33 от 24.01.2014 «Методика проведения специальной оценки условий труда. Классификация вредных и (или) опасных производственных факторов».

Приведенный перечень иллюстрирует важность со стороны законодательной власти и системы управления вопросов сохранения и воспроизводства рабочей силы и человеческих ресурсов. При этом за рамками представленного перечня документации остаются нормативные документы других ведомств, имеющих отношение к профессионально-прикладной физической культуре.

В качестве профессиональных рисков и вредностей выступает большой список факторов природного характера. В их число входят высокая и крайне низкая температура, повышенная влажность воздуха; существенно меняющаяся в течение годового макроцикла температура окружающей среды, состав воздуха в рабочей зоне, зависящий от работы механизмов и машин, используемых в производстве; наличие мелкодисперсной составляющей разрабатываемых пород, образующей взвеси с выраженным влиянием на показатели здоровья работников [1, 2].

Особо следует отметить работу в условиях воздействия вибрационных нагрузок. Изолирование рабочих от вибрационных нагрузок является сложной технической задачей и данный фактор существенно осложняет как трудовой процесс, так и жизнедеятельность работников в повседневной деятельности вследствие затрудненного и длительного процесса восстановления физических кондиций.

Подземные условия разработки, в отличие от открытых горных работ, отличаются не только концентрированным воздействием указанных выше вредностей, но и более значительным воздействием специфических факторов трудовой деятельности в шахте, а именно высоким уровнем нагрузок в сфере, относящейся одновременно к двум сферам: физической – в части прикла-

дываемых мышечных усилий и одновременно к эмоциональной – в части воздействий на собственно личность работника в непривычных для него условиях. Условия работы под землей для человека как биологического существа не являются естественными, что вызывает повышение тревожности и других характеристик психологического статуса субъекта.

Рассматривая вопросы освещенности рабочей зоны и окружающего пространства как при проведении открытых горных работ, так и в условиях подземных горных выработок, необходимо учитывать физиологические особенности органов зрения. Аккомодация, обусловленная концентрацией внимания на рабочей зоне, затруднена при необходимости срочного реагирования на внешние раздражители, порой неизвестного происхождения. Указанное обстоятельство также предусматривает снижение контраста в степени освещенности разных зон в рабочем пространстве.

Сложность в обеспечении физиологически обоснованных уровней освещенности всех зон пространства обуславливается повышенным вниманием непосредственно к зоне выполнения трудовой функции, выделением ее в сравнении с окружением, а также вопросами экономии энергии организмом на второстепенных моментах, что не позволяет повысить производительность труда, а при продолжительных нагрузках, наоборот, приводит к ее снижению.

Сочетание воздействия нескольких факторов приводит к синергетическому негативному влиянию указанных факторов на организм работника. Указанное обстоятельство является следствием особенностей реагирования организма человека на варьирование внешних условий его функционирования и приспособительной реакцией на воздействия, приводящие к нарушению гомеостаза, выступающего условием, обеспечивающим оптимальную жизнедеятельность внутренних органов и систем.

Пластичность сложной биологической системы, возможность приспособительных реакций ограничены по мощности, адаптационные ресурсы ее в обычных условиях распределены с прицелом на удовлетворение главных потребностей. Главными потребностями у сложных биологических систем в первую очередь выступают собственные запросы. При этом расходование адаптационных ресурсов на внешние воздействия носит спонтанный и вынужденный характер.

Выполнение трудовых функций в горном деле часто связано с приложением физических

усилий, что во многих случаях не предусмотрено штатным трудовым процессом, но становится необходимым в конкретных условиях реализации трудовых функций. Готовность к приложению физических усилий наблюдается только у конкретного субъекта трудового процесса, не имеющего с точки зрения медицинских показателей противопоказаний для работы по избранной профессии, а также обладающего достаточной подготовленностью для развития необходимого усилия в конкретной обстановке.

В настоящее время роль профессионально-прикладной физической подготовки не отрицается ни исследователями, ни практическими работниками. Отдельные крупные предприятия в моногородах решают задачи через общее укрепление параметров здоровья трудящихся без упора на профессионально-прикладную физическую подготовку. При этом обращается внимание на условия проведения массовых спортивных мероприятий, для чего в большем объеме предлагается реализация поставленных задач оздоровления населения путем системной работы под открытым небом, а не в помещении [3].

Вопросы базовой подготовки будущих работников горнодобывающей промышленности в области развития двигательных навыков и формирования физических способностей сейчас решаются в формате Всероссийского физкультурно-спортивного комплекса «Готов к труду и обороне» (ГТО). Его активное использование позволяет провести предварительную физическую подготовку детей на этапе предпрофессионального ориентирования в выборе профессии [4].

Отмеченное нами системное повышение интенсивности труда, постепенный переход от непосредственного приложения физических усилий в деятельности операторской, связанной с ростом не только физической нагруженности, но и с интеллектуальным напряжением, отражается в публикациях, посвященных подготовке специалистов с высшим образованием в различных сферах народного хозяйства. Следует отметить, что специализированность трудовых операций требовала внимания к физической профессионально ориентированной подготовке медиков [5]. Специфичность функционала оперирующего хирурга в свое время привела Н.М. Амосова к созданию на собственном опыте режима ограничений и нагрузок, в рамках которого, наряду с общеукрепляющими упражнениями, дающими возможность обеспечить необходимую продолжительность работы поздних мышц, им использова-

лись специальные упражнения для оперирующих хирургов.

Работы в части ориентирования студентов на профессионально-прикладную физическую подготовку получили свое освещение в ведущем специализированном журнале «Теория и практика физической культуры» [6].

Наблюдающееся внимание не только к вопросам профессионально-прикладной физической подготовки, но также рассмотрение этой подготовки как особой специфической области физического воспитания является результатом понимания специфичности воспитания в части физической культуры. Эта специфичность базируется на разновременности формирования тех или иных физических качеств вследствие особенностей биологического развития субъекта [7].

Педагогическая профессия также предполагает наличие специфических требований к физической подготовленности студентов. В частности, Т.А. Михайлова с соавторами обращает внимание на необходимые результаты проводимой профессионально-прикладной физической подготовки: «Таким образом, результатом профессионально-прикладной физической подготовки являются формирование у студентов системы научных знаний, умений и навыков прикладного характера, позволяющих качественно и быстро решать профессионально-педагогические задачи в повседневной деятельности; воспитание психофизиологических качеств (выносливости, силы, быстроты, гибкости, эмоциональной устойчивости и др.), проявление которых повышает эффективность педагогической деятельности учителя, а также развивает прикладные специальные качества, необходимые для поддержания, сохранения и развития здоровья» [8].

Приведенный фрагмент показывает вектор развития профессионально-прикладной физической подготовки, подчеркивает важность предварительного исследования условий деятельности в соответствующей отрасли и даже затрагивает смежные вопросы психофизиологической устойчивости личности педагога в современном образовательном процессе.

Введение профессионально-прикладной физической подготовки в систему непрерывного физического воспитания молодежи, рассмотренное В.А. Кабачковым с соавторами [9], подтверждает тезис о повышении роли такой подготовки в решении задач развития подрастающего поколения, что, на наш взгляд, особенно важно в ситуации системного снижения численности насе-

ления Российской Федерации, сокращения трудоспособного населения и проведенной пенсионной реформы.

Профессионально-прикладная физическая подготовка рассматривается в том числе за пределами Российской Федерации. Обладающая собственной горнодобывающей промышленностью Республика Беларусь также включила вопросы такой подготовки в перечень актуальных для нее моментов [10].

Именно достаточная подготовленность будет в конечном счете определять успешность выполнения конкретным работником той или иной трудовой функции. Установленные нормативными документами предельные значения силовых показателей, предусмотренных той или иной трудовой функцией, рассчитаны разработчиками норм нагрузки исходя из, во-первых, средних статистических характеристик взрослого трудоспособного населения и, во-вторых, основаны на данных практической проверки затрат энергии при выполнении определенных действий.

Затраты энергии, рассматриваемые в этом случае, в меньшей степени подвержены коррекции в зависимости от персональных особенностей телосложения, но функционально обусловлены самими задачами, для выполнения которых приходится прилагать мышечные усилия. Прикладываемые мышечные усилия являются следствием расчетных условий, то есть предусмотренных при выполнении операций по технологической карте. В то же время необходимо отметить невозможность учета вариативности всех возможных внешних условий реализации трудовой функции.

Таким образом, согласно используемым в настоящее время нормативным документам в части оценки условий труда работников горнодобывающей промышленности, предусматривается постоянное снижение воздействия профессиональных вредностей на здоровье трудящихся. Как показывает практика, эффект от снижения влияния профессиональных вредностей в части снижения профессиональных заболеваний проявится через длительный промежуток времени, измеряемый, по оптимистичным прогнозам, несколькими годами.

Синергетическое воздействие неблагоприятных факторов в горнодобывающей промышленности подтверждается динамикой выявления профессиональных заболеваний у работников в период прохождения планового медицинского осмотра. При этом статистические данные подтверждают тезис о более выраженном влиянии

неблагоприятных факторов на здоровье работников: в среднем за 2012-2022 годы более 100 случаев на 10000 работающих на подземных работах против приблизительно 26 случаев на 10000 работающих на открытых горных разработках [11].

Что касается структуры выявления профессиональных заболеваний, то вибрационная болезнь является ведущей и на открытых горных разработках, и при работе в шахтах. При анализе подземной добычи доля ее составляет более 27%, а для открытых горных разработок эта доля достигает 48% [9].

При проведении планового медицинского осмотра выявлена практически одинаковая доля заболеваний, вызванных перенапряжением отдельных органов и систем организма. Подобные заболевания характерны для профессий, требующих постоянного нервного напряжения. К числу таких профессий относится сфера «диспетчеризации». Представители этой профессии вынуждены длительное время находится в непрерывном напряжении и постоянно отслеживать динамично изменяющуюся ситуацию и мгновенно реагировать даже на незначительные изменения. Среди выявленных заболеваний практически четверть относится к таковым. Если суммировать заболеваемость органов дыхания, то в случае подземной добычи они занимают более 30%, а для открытых горных разработок эта доля достигает 15% [11].

Анализ статистических характеристик проявил еще одну особенность – это возраст выявления профессиональных заболеваний, который составляет около 50 лет. Установленный факт проявления профессиональных заболеваний у работников с длительным трудовым стажем в отрасли подчеркивает пролонгированный период формирования профессиональных заболеваний и необходимость упреждающего профилактического воздействия на организм субъекта трудового процесса [12].

Авторами предлагается подход, основанный на упреждающем характере профилактических воздействий на организм будущего специалиста горной отрасли. Профессионально-прикладное профилактическое воздействие должно развить у молодого человека требуемые физические качества, причем в таком проявлении, чтобы его организм справлялся с вредными факторами, свойственными предстоящей должности.

Следовательно, акцент в профилактической работе по предупреждению профессиональных заболеваний необходимо сместить на период

формирования физических качеств. Выявленный при проведении медицинских осмотров признак заболеваний органов дыхания ориентирует на признание особой роли дыхательной системы в длительной безболезненной трудовой деятельности для работников горнодобывающей промышленности.

В отличие от физической культуры как части образовательной программы, необходимо развивать физические качества в возможной степени для каждого обучающегося в зависимости от его задатков, при этом в период профессиональной подготовки следует обеспечить будущим специалистам горного дела занятия физическими упражнениями с особо поставленными задачами.

Переводя изложенное в рамки образовательного процесса в учебном заведении, предназначенном для профессиональной подготовки, целесообразно физическую подготовку вести как ориентированную на повышение готовности к работе в соответствующих условиях. Развитие дыхательной системы, как в части увеличения доступных объемов, так и в части повышения эффективности использования уже имеющихся, – процесс длительный и требующий систематических правильно подобранных нагрузок. Такие нагрузки, по нашему мнению, следует ориентировать на получение и закрепление на организационном уровне физиологически обусловленных изменений, предлагаемых по оптимальной для таких задач схеме. Тем самым занятия физическими упражнениями для будущих специалистов горного дела из разряда общеразвивающих переходят в категорию профессионально ориентированных. Кроме того, наряду с изменением роли учебного предмета «Физическая культура» в части двигательной активности, именуемого в настоящее время «Элективные курсы по физической культуре», необходимо изменение отношения к нему со стороны всех участников образовательного процесса.

В рамках учебной дисциплины «Элективные курсы по физической культуре» для студентов института горного дела и транспорта, обучающихся по специальности «Горное дело», проведен эксперимент, ориентированный на увеличение доли нагрузок на общую и силовую выносливость. В экспериментальной группе из 29-ти студентов помимо роста результатов в спортивных соревнованиях получены положительные сдвиги в тестовых обследованиях. В частности, в пробах Штанге и Генчи на задержку дыхания получено достоверное улучшение при $p = 0,05$. Снижение

частоты сердечных сокращений в покое и высота прыжка на месте по методу В.М. Абалакова продемонстрировали положительную динамику на уровне тенденции.

Из всего изложенного следует сделать вывод о необходимости определения новой роли указанной учебной дисциплины как профессиональной дисциплины. Для этого указанную дисциплину в рамках выдвинутой гипотезы предлагается рассматривать как «Систему профессионально прикладной физической подготовки», задачами которой выступает развитие у студентов их физических качеств в направлении обеспечения длительной трудовой деятельности без получения профессиональных заболеваний, активно осложняющих трудовой процесс.

Отмеченное авторами смещение акцента в подготовке будущих специалистов горного дела на роль физической культуры как предмета профессиональной подготовки ни в коей мере не предполагает снижения внимания к условиям труда в горной отрасли. Оно направлено на повышение в конечном счете качества жизни специалистов, избравших путь горного инженера. В этом случае достигается не сиюминутный эффект от затраченных усилий, но ставится задача достижения социального, общенародного эффекта для снижения заболеваемости и предотвращения инвалидизации трудящихся в сфере горнодобывающей промышленности.

Список источников

1. Чеботарев А.Г. Прогнозирование условий труда и профессиональной заболеваемости у работников горнорудных предприятий // Горная промышленность. 2016. №3. С. 2-5.
2. Чеботарев А.Г. Состояние условий труда и профессиональной заболеваемости работников горнодобывающих предприятий // Горная промышленность. 2018. №1. С. 92-95.
3. Белкина К.Е., Жаров А.А., Звонарев Д.В. Организация любительских футбольных соревнований трудящейся молодежи г. Магнитогорска // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 74-й междунар. науч.-практ. конф. Магнитогорск, 2016. Т. 2. С. 331-332.
4. Мицан Е.Л. Формирование физической и психологической готовности детей к выполнению норм комплекса ГТО // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 74-й междунар. науч.-практ. конф. Магнитогорск, 2016. Т. 2. С. 183-185.
5. Буйкова О.М. Профессионально-прикладная физическая культура студентов медицинского вуза: учеб. пособие. Иркутск: ИГМУ, 2016. 31 с.

6. Габриелян К.Г., Ермолаев Б.В. Профессионально-прикладная физическая подготовка студентов. Смена парадигмы // Теория и практика физической культуры. 2006. № 12. С. 24-41.
7. Фёдорова Т.Н. Значение профессионально-прикладной физической подготовки как особой разновидности физического воспитания // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 3. С. 403. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=19742> (дата обращения: 28.02.2023).
8. Михайлова Т.А., Елагина В.С. Профессионально-прикладная физическая подготовка студентов педагогического вуза // Современные проблемы науки и образования. 2022. № 5. С. 32. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=32071> (дата обращения: 28.02.2023).
9. Кабачков В.А., Полиевский С.А., Буров А.Э. Профессиональная физическая культура в системе непрерывного образования молодежи. М.: Советский спорт, 2010. 296 с.
10. Кудрицкий В.Н. Профессионально-прикладная физическая подготовка. Брест: БГТУ, 2005. 275 с.
11. О состоянии профессиональной заболеваемости в Российской Федерации в 2016 г. // Информационный сборник статистических и аналитических материалов Роспотребнадзора. М., 2017. 65 с.
12. Бухтияров И.В., Чеботарев А.Г., Прохоров В.А. Проблемы оздоровления условий труда, профилактики профессиональных заболеваний работников предприятий горнорудного комплекса // Горная промышленность. 2015. №6. С. 14-17.
5. Buikova O.M. *Professionalno-prikladnaya fizicheskaya kultura studentov meditsinskogo vuza: uchebnoe posobie* [Occupation-specific applied physical education for medical university students: study guide]. Irkutsk: Irkutsk State Medical University; 2016. 31 p. (In Russ.)
6. Gabrielyan K.G., Ermolaev B.V. Occupation-specific applied physical education for students. Paradigm shift. *Teoriya i praktika fizicheskoi kultury* [Theory and Practice of Physical Education]. 2006;(12):24-41. (In Russ.)
7. Fedorova T.N. The value of occupation-specific applied physical education as a special kind of physical education. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern Problems of Science and Education]. 2015;(3):403. Available at: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=19742> (Accessed on February 28, 2023)
8. Mikhailova T.A., Elagina V.S. Occupation-specific applied physical education for students of teachers' training university. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern Problems of Science and Education]. 2022;(5):32. Available at: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=32071> (Accessed on February 28, 2023)
9. Kabachkov V.A. Polievsky S.A., Burov A.E. *Professionalnaya fizicheskaya kultura v sisteme nepreryvnogo obrazovaniya molodezhi* [Professional physical education in the system of continuous education of youth]. Moscow: Soviet Sport; 2010. 296 p. (In Russ.)
10. Kudritsky V.N. *Professionalno-prikladnaya fizicheskaya podgotovka* [Occupation-specific applied physical training]. Brest: Brest State Technical University; 2005. 275 p. (In Russ.)
11. *O sostoyanii professionalnoy zabolevaemosti v Rossiiskoi Federatsii v 2016 g.* [On the state of occupational morbidity in the Russian Federation in 2016]. Information collection of statistical and analytical documents of Rospotrebnadzor. Moscow: 2017. 65 p. (In Russ.)
12. Bukhtiyarov I.V., Chebotarev A.G., Prokhorov V.A. Problems of improving working conditions, prevention of occupational diseases among employees of mining complex enterprises. *Gornaya promyshlennost* [Mining Industry]. 2015;(6):14-17. (In Russ.)

References

Поступила 28.02.2023; принята к публикации 14.03.2023; опубликована 27.03.2023
Submitted 28/02/2023; revised 14/03/2023; published 27/03/2023

Андреева Ольга Викторовна – кандидат педагогических наук, доцент кафедры физической культуры, доцент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: olgaandreeva240563@mail.ru. ORCID 0000-0003-3227-6223

Пыталев Иван Алексеевич – доктор технических наук, профессор, директор института горного дела и транспорта, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: vehicle@list.ru. ORCID 0000-0002-5415-8079

Шестопалов Евгений Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры физической культуры, доцент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: eugene-52@yandex.ru. ORCID 0000-0003-4130-9613

Якшина Виктория Владимировна – кандидат технических наук, ассистент кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: yakshina1994@inbox.ru. ORCID 0000-0002-9577-7036

Olga V. Andreeva – PhD (Pedagogy), Associate Professor of the Physical Education Department, Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: olgaandreeva240563@mail.ru. ORCID 0000-0003-3227-6223

Ivan A. Pytalev – DrSc (Eng.), Professor, Director of the Mining and Transport Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: vehicle@list.ru. ORCID 0000-0002-5415-8079

Evgenii V. Shestopalov – PhD (Eng.), Associate Professor of the Physical Education Department, Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: eugene-52@yandex.ru. ORCID 0000-0003-4130-9613

Viktoriya V. Yakshina – PhD (Eng.), Assistant Professor of the Minerals Mining Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: yakshina1994@inbox.ru. ORCID 0000-0002-9577-7036

УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

Мы приглашаем Вас к участию в нашем журнале в качестве авторов, рекламодателей и читателей.

Журнал издается с 2003 г., с 2007 г. включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук. Журнал входит в Перечень по следующим группам научных специальностей:

- 2.5.5. Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки).
- 2.5.6. Технология машиностроения (технические науки).
- 2.5.7. Технологии и машины обработки давлением (технические науки).
- 2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства (технические науки).
- 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки).
- 2.6.2. Металлургия черных, цветных и редких металлов (технические науки).
- 2.6.3. Литейное производство (технические науки).
- 2.6.4. Обработка металлов давлением (технические науки).
- 2.6.5. Порошковая металлургия и композиционные материалы (технические науки).
- 2.6.6. Нанотехнологии и наноматериалы (технические науки).
- 2.8.7. Теоретические основы проектирования горнотехнических систем (технические науки).

Журнал формируется по разделам, отражающим основные направления научной деятельности ученых МГТУ, в частности:

- Разработка полезных ископаемых.
- Металлургия черных, цветных и редких металлов.
- Обработка металлов давлением.
- Литейное производство.
- Технологии обработки материалов.
- Металловедение и термическая обработка металлов.
- Стандартизация, сертификация и управление качеством.
- Моделирование металлургических процессов.
- Новые технологические процессы и оборудование.
- Энергетика металлургии, энергосбережение и электротехнические комплексы.
- Управление, автоматизация и информационные технологии в металлургии.
- Строительные материалы и строительные технологии в металлургии.
- Экология металлургической отрасли.
- Экономика, управление и рынок продукции.
- Стратегия развития, подготовка и обучение специалистов.
- Информация и др.

ТРЕБОВАНИЯ К СТАТЬЯМ, ПРИНИМАЕМЫМ К ПУБЛИКАЦИИ

1. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СТАТЬИ (на русском и английском языках)

1.1. Наименование статьи (не более 15 слов). Должно кратко отражать содержание статьи. Не рекомендуется использовать сокращения и аббревиатуры.

1.2. Аффiliation. Указывается фамилия, имя, отчество авторов (транслитерация), ученая степень, звание, должность, индивидуальный авторский идентификатор ORCID, полное название организации (ее официально принятый английский вариант), адрес электронной почты хотя бы одного из авторов.

1.3. Аннотация (200-250 слов). Включает постановку задачи (актуальность работы), цель, используемые методы (эксперименты), новизну, результаты, практическую значимость (направления развития).

Онлайн-перевод запрещается!

1.4. Ключевые слова: от 5 до 15 основных терминов.

2. СТРУКТУРА ОСНОВНОЙ ЧАСТИ СТАТЬИ

2.1. Введение (постановка проблемы).

2.2. Теория, материалы и методы исследования, технические и технологические разработки.

2.3. Результаты исследования и их обсуждение.

2.4. Заключение (выводы).

2.5. Список литературы (на русском и английском языках).

3. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЬИ

3.1. Рекомендуемый объем статьи – 8-10 страниц.

3.2. Текст статьи, сведения об авторах, аннотация, ключевые слова и список источников представляются на электронном носителе в виде файла, созданного средствами **Microsoft Word**.

При наборе статьи в **Microsoft Word** рекомендуются следующие установки:

- **шрифт** – **Times New Roman**, размер – 11 пт, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический;
- при вставке **формул** использовать встроенный редактор формул **Microsoft Equation** со стандартными установками, применяется только сквозная нумерация;
- **иллюстрации** не должны превышать ширины колонки (80 мм) или ширины страницы (170 мм). Для подписей элементов на иллюстрации используется шрифт TimesNewRoman 11 пт. Рисунки представляются в редакцию в двух форматах: редактируемом и нередатируемом (*.jpg; качество не менее 300 dpi). В тексте статьи должны быть подрисовочные подписи в местах размещения рисунков. В конце подписи к рисунку точка не ставится. Например:

Рис. 4. Расчётная зависимость $\gamma(t)=I_{n0}/I_{n0}$ от времени и удалённости КЗ от выводов асинхронного двигателя

- **таблицы** нумеруются, если их число более одной. Заголовок необходим, когда таблица имеет самостоятельное значение, без заголовка дают таблицы вспомогательного характера.

3.3. При подготовке рукописи необходимо руководствоваться Международной системой единиц **СИ**.

4. ДОКУМЕНТЫ, ПРИЛАГАЕМЫЕ К СТАТЬЕ

4.1. Заключение о возможности открытого опубликования.

4.2. Договор.

Внимание! Публикация статей является бесплатной. Преимущество опубликования предоставляется авторам и учреждениям, оформившим подписку на журнал.

Статьи проходят обязательное научное рецензирование. Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям.

Телефон: (3519) 22-14-93.

Email: vestnik@magtu.ru; rio_mgtu@mail.ru.