

# ВЕСТНИК

Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова

2024. Т.22, №3

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

Председатель редакционной коллегии  
В.М. Колокольцев (Россия)

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

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.magtu.ru>  
Email: [vestnik@magtu.ru](mailto:vestnik@magtu.ru); [rio\\_magtu@mail.ru](mailto:rio_magtu@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 30.09.2024. Заказ 257. Тираж 500 экз. Цена свободная.

# VESTNIK

of Nosov Magnitogorsk State Technical University

---

2024. Vol.22, no.3

---

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

PUBLISHED SINCE MARCH, 2003

## EDITORIAL BOARD MEMBERS

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

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

## EDITORIAL STAFF

Editor-in-Chief O.N. Tulupov

First Deputy Chief Editor M.A. Polyakova

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

Editor N.P. Boyarova

Technical Editor A.A. Neroda

Translated into English O.E. Sukhikh

The cover is designed by A.D. Grigorev

© Federal State Budgetary Institution of Higher Education  
Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2024

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

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

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

### Editorial office:

402, 45/2 Karl Marks prospekt,  
Magnitogorsk, Chelyabinsk region, 455000, Russia  
Nosov Magnitogorsk State Technical University  
Phone: +7 (3519) 221 493.  
URL: <http://www.vestnik.magtu.ru>  
Email: [vestnik@magtu.ru](mailto:vestnik@magtu.ru); [rio\\_mgtu@mail.ru](mailto: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: 30.09.2024. Order 257. Circulation: 500. Open price.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ .....</b>	<b>5</b>
<i>Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Никитин И.В., Соломеин Ю.М.</i>	
Обоснование рациональной конструкции днища блока при комбинированной системе разработки пологих залежей средней мощности .....	5
<i>Славиковская Ю.О.</i>	
Экономическая оценка эффективности освоения месторождения с учетом использования техногенных пустот недр .....	13
<i>Бекберген Д.К., Джангулова Г.К., Жанакова Р.К., Абиев Б.А.</i>	
Возможность повторной выемки руд из междукammerных целиков с полевой подготовкой в условиях обрушенной зоны с мульдой сдвижения залежей .....	22
<i>Евдокимов С.И., Герасименко Т.Е., Горлова О.Е., Орехова Н.Н.</i>	
Разработка метода и установки для измерения размера пузырьков в условиях, моделирующих режим паровоздушной флотации.....	33
<b>ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО.....</b>	<b>43</b>
<i>Юров В.В., Цыганов И.А., Припадчева Н.А.</i>	
Идентификация дефектов газового характера в деталях из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, изготовленных по технологии литья по газифицируемым моделям.....	43
<b>МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ .....</b>	<b>52</b>
<i>Уздиева Н.С., Ахтаев С.С.-С., Айсунгуров Н.Д.</i>	
Формирование полунепрерывнолитой заготовки при вибровоздействии .....	52
<b>ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ.....</b>	<b>60</b>
<i>Радионова Л.В., Громов Д.В., Фаизов С.Р., Лисовский Р.А., Зараменских С.Е., Глебов Л.А.</i>	
Методика расчета энергосиловых параметров прокатки полосы на стане ДУО-130.....	60
<b>ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ ..</b>	<b>71</b>
<i>Зайдес С.А., Буй М.З., Пономарев Б.Б.</i>	
Правка локального участка цилиндрических деталей перед обкаткой гладкими плитами .....	71
<i>Альбов М.А., Акулиничев П.Д., Гончаров А.А.</i>	
Современные методы получения внутренних циклоидальных винтовых поверхностей.....	81
<i>Мальков О.В., Карельский А.С.</i>	
Расчет силы резания при обработке внутренней резьбы гребенчатыми резьбовыми фрезами .....	92
<i>Генералова А.А., Никулин А.А., Бычков Д.С.</i>	
Моделирование текстуры волнистости поверхности при токарной обработке шкивов.....	101

## CONTENTS

<b>SUBSOIL USE .....</b>	<b>5</b>
<i>Sokolov I.V., Antipin Yu.G., Nikitin I.V., Solomein Yu.M.</i>	
Substantiation of a Rational Block Bottom Structure at a Combined Mining System of Shallow Deposits of Medium Capacity .....	5
<i>Slavikovskaya Yu.O.</i>	
Economic Assessment of Field Development Efficiency Factoring into the Use of Man-Caused Subsoil Voids.....	13
<i>Bekbergenov D.K., Dzhangulova G.K., Zhanakova R.K., Abiev B.A.</i>	
The Possibility of Repeated ore Extraction from Rooms and Pillars with Field Preparation in a Collapsed Zone with a Shift Trough of Deposits.....	22
<i>Evdokimov S.I., Gerasimenko T.E., Gorlova O.E., Orekhova N.N.</i>	
Development of a Bubble Size Measurement Method and System Under Conditions Simulating the Vapor-Air Flotation Mode .....	33
<b>FOUNDRY ENGINEERING.....</b>	<b>43</b>
<i>Yurov V.V., Tsyganov I.A., Pripadcheva N.A.</i>	
Identification of Defects of Gas Nature in Parts Made of High-Strength Cast Iron with Spherical Graphite Manufactured According to the Lost Foam Casting Technology .....	43
<b>METALLURGY OF FERROUS, NON-FERROUS AND RARE METALS.....</b>	<b>52</b>
<i>Uzdieva N.S., Akhtaev S.S.-S., Aisungurov N.D.</i>	
Formation of Semi-Continuously Cast Billets under Vibration.....	52
<b>METAL FORMING.....</b>	<b>60</b>
<i>Radionova L.V., Gromov D.V., Faizov S.R., Lisovsky R.A., Zaramenskikh S.E., Glebov L.A.</i>	
A Method for Calculating Energy and Power Parameters of Strip Rolling on Duo Mill 130.....	60
<b>MATERIAL PROCESS ENGINEERING.....</b>	<b>71</b>
<i>Zaides S.A., Bui M.D., Ponomarev B.B.</i>	
Straightening a Local Area of Cylindrical Parts before Rolling with Smooth Plates .....	71
<i>Albov M.A., Akulinichev P.D., Goncharov A.A.</i>	
Modern Methods for Producing Internal Cycloidal Helical Surfaces .....	81
<i>Malkov O.V., Karelsky A.S.</i>	
Calculation of Cutting Force when Machining Internal Threads with Thread Milling Cutters .....	92
<i>Generalova A.A., Nikulin A.A., Bychkov D.S.</i>	
Modeling the Texture of a Wavy Surface During Pulley Turning .....	101

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ  
ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ..... 113**

*Емельюшин А.Н., Миненко С.С., Громов В.Е.,  
Чапайкин А.С.*  
Структура и свойства быстрорежущего сплава  
P2M9ЮАТ после наплавки и отпуска ..... 113

**УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ.  
СТАНДАРТИЗАЦИЯ. ОРГАНИЗАЦИЯ  
ПРОИЗВОДСТВА ..... 121**

*Васин С.А., Фетисов М.Н., Трушин Н.Н.*  
Материальное стимулирование  
инженеров-конструкторов авиационного  
предприятия как инструмент обеспечения  
ритмичности проектной деятельности ..... 121

*Ивахненко А.Г., Аникеева О.В., Исламова О.В.,  
Разумова А.И., Гуляев К.А.*  
Параметрический анализ структурных моделей  
взаимодействующих процессов на основе IDEF3 ... 131

*Максимова О.В.*  
Влияние авторитарности и доверия на структуру  
консенсусного решения ..... 140

*Прыткова Е.А., Давыдов В.М.*  
Применение многофакторного анализа показателей  
качества машиностроительной продукции  
для оптимизации бизнес-процессов ..... 152

*Третьякова В.А., Горлачева Е.Н.*  
Разработка гибкой системы планирования  
производственной программы в условиях работы  
с госзакупками ..... 160

**МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ  
ПРОЦЕССОВ ..... 170**

*Терентьев Д.В., Усанов М.Ю., Шеметова Е.С.,  
Платов С.И., Харитонов В.А.*  
Оценка напряженно-деформированного состояния  
сталемедной проволоки при волочении в монолитной  
волоке на основе моделирования ..... 170

*Логинов Ю.Н., Непряхин С.О., Исякаев К.Т.*  
Моделирование толстолистовой прокатки  
алюминиевого сплава с вариантносью прохождения  
процессов разупрочнения ..... 178

**НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ  
И ОБОРУДОВАНИЕ ..... 188**

*Кабалдин Ю.Г., Аносов М.С., Чернигин М.А.,  
Мордовина Ю.С.*  
Оценка влияния дефектности металла заготовок,  
полученных аддитивными методами, на прочностные  
свойства с использованием нейронносетового  
моделирования ..... 188

**MATERIALS SCIENCE AND HEAT TREATMENT  
OF METALS ..... 113**

*Emelyushin A.N., Minenko S.S., Gromov V.E.,  
Chapaikin A.S.*  
Structure and Properties Of High Speed Steel  
R2M9YuAT after Surfacing and Tempering ..... 113

**PRODUCT QUALITY MANAGEMENT.  
STANDARDIZATION. INDUSTRIAL  
MANAGEMENT ..... 121**

*Vasin S.A., Fetisov M.N., Trushin N.N.*  
Financial Incentives for Design Engineers  
of an Aircraft Manufacturing  
Company as a Tool for Ensuring the Design  
Activity Rhythmicity ..... 121

*Ivakhnenko A.G., Anikeeva O.V., Islamova O.V.,  
Razumova A.I., Gulyaev K.A.*  
Parametric Analysis of Structural Models of Interacting  
Processes Based on IDEF3 ..... 131

*Maksimova O.V.*  
Influence of Authoritarianism and Trust on the Structure  
of a Consensus Decision ..... 140

*Prytkova E.A., Davydov V.M.*  
The Use of a Multi-Factor Analysis of Engineering  
Product Quality Indicators to Optimize Business  
Processes ..... 152

*Tretyakova V.A., Gorlacheva E.N.*  
The Elaboration of the Flexible Production Program  
Planning System in Terms of the Public Procurement  
System ..... 160

**MODELLING OF METALLURGICAL  
PROCESSES ..... 170**

*Terentev D.V., Usanov M.Yu., Shemetova E.S.,  
Platov S.I., Kharitonov V.A.*  
Assessing the Stress and Strain State of Steel-Copper  
Wire Based on Modeling of Drawing  
in a Monolithic Die ..... 170

*Loginov Yu.N., Nepryakhin S.O., Isyakaev K.T.*  
Simulation of Plate Rolling  
of the Aluminum Alloy with Options  
of Softening Processes ..... 178

**NEW TECHNOLOGICAL PROCESSES  
AND EQUIPMENT ..... 188**

*Kabalдин Yu.G., Anosov M.S., Chernigin M.A.,  
Mordovina Yu.S.*  
Neural Network Modeling Used to Assess the Effect  
of Metal Defects of Blanks Produced by Additive  
Methods on Strength Properties ..... 188



## **ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ ДНИЩА БЛОКА ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ РАЗРАБОТКИ ПОЛОГИХ ЗАЛЕЖЕЙ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ**

**Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Никитин И.В., Соломеин Ю.М.**

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

**Аннотация. Актуальность работы.** В настоящее время для отработки запасов вкрапленных медно-никелевых руд, представленных пологими залежами преимущественно средней мощности, применяется система этажного принудительного обрушения с торцовым выпуском руды. Данной технологии присущи весьма высокие потери и разубоживание руды (25-30% и более). Для повышения полноты и качества выемки запасов предложена комбинированная система разработки, сочетающая этажно-камерную систему и систему этажного обрушения с торцовым выпуском руды. Ее эффективность в значительной степени обусловлена конструкцией днища блока, определяющей количество горизонтов и основные параметры выпуска руды. **Цель работы.** Обоснование рациональной конструкции днища блока при комбинированной системе разработки, обеспечивающей полноту и качество выемки запасов при минимизации затрат на подготовительно-нарезные работы и очистную выемку. **Используемые методы.** Использован комплексный метод исследований, включающий анализ практики и условий применения комбинированной системы разработки, конструирование, экономико-математическое моделирование и сравнительный анализ. **Результаты.** Рассмотрены три варианта конструкции днища блока: траншейное, плоское и комбинированное. Установлено, что во всем диапазоне изменения мощности залежи от 10 до 25 м вариант с комбинированным днищем имеет наименьшие потери руды (3-12%) при относительно небольшом разубоживании (13-20%), а вариант с плоским днищем – наибольшие потери (33-35%) при минимальном разубоживании (1,2-3,5%). При этом эксплуатационные затраты на подготовительно-нарезные работы и очистную выемку по варианту с комбинированным днищем на 4-10% ниже, чем по варианту с траншейным днищем. **Выводы.** Установлено, что вариант с комбинированным днищем (камера с плоским днищем и междукамерный целик с траншейным днищем) обеспечивает наилучшие показатели извлечения при минимальных затратах на подготовительно-нарезные работы и очистную выемку.

**Ключевые слова:** пологое месторождение, комбинированная система разработки, камера, междукамерный целик, конструкция днища, потери, разубоживание, эксплуатационные затраты, прибыль

*Исследования выполнены в рамках Госзадания №075-00412-22 ПР. Тема 1 (2022-2024). Методологические основы стратегии комплексного освоения запасов месторождений твердых полезных ископаемых в динамике развития горнотехнических систем (FUWE-2022-0005), рег. №1021062010531-8-1.5.1.*

© Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Никитин И.В., Соломеин Ю.М., 2024

### **Для цитирования**

Обоснование рациональной конструкции днища блока при комбинированной системе разработки пологих залежей средней мощности / Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Никитин И.В., Соломеин Ю.М. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №3. С. 5-12. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-5-12>



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

# SUBSTANTIATION OF A RATIONAL BLOCK BOTTOM STRUCTURE AT A COMBINED MINING SYSTEM OF SHALLOW DEPOSITS OF MEDIUM CAPACITY

Sokolov I.V., Antipin Yu.G., Nikitin I.V., Solomein Yu.M.

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

**Abstract. Relevance.** The block caving system with frontal ore drawing is used to mine the reserves of interspersed copper-nickel ores represented by shallow deposits of mainly medium capacity. This technology is characterized by very high losses and dilution of ore (25-30% or more). To improve completeness and the quality of extraction of reserves, the authors proposed a combined mining system, including a chamber system and a block caving system with frontal ore drawing. Its efficiency is largely conditioned by a block bottom structure, which determines the number of horizons and the main parameters of ore drawing. **Objectives.** The research is aimed at providing a substantiation of the rational block bottom structure at a combined mining system that ensures completeness and the quality of excavation of reserves, while minimizing the costs for development and face-entry drivage and stoping. **Methods Applied.** The authors used a comprehensive research method, including an analysis of the practice and application conditions of the combined mining system, design, economic and mathematical modeling and a comparative analysis. **Results.** The paper describes three options of the block bottom structure: trench, flat and combined structures. It has been found that in a total range of capacity from 10 to 25 m, the option with the combined bottom has the lowest ore losses (3-12%) at a relatively low dilution (13-20%), and the option with the flat bottom has the greatest losses (33-35%) at a minimum dilution (1.2-3.5%). At the same time, the operating costs for development and face-entry drivage and stoping in the option with the combined bottom are 4-10% lower than in the option with a trench bottom. **Conclusions.** It has been found that the option with a combined bottom (the chamber with a flat bottom and a safety pillar with a trench bottom) provides the best ore extraction indicators at minimum costs for development and face-entry drivage and stoping.

**Keywords:** shallow deposit, combined mining system, chamber, safety pillar, bottom structure, losses, dilution, operating costs, profit

*The research was carried out within the framework of State Assignment No. 075-00412-22 PR. Subject 1 (2022-2024). Methodological foundations of the strategy for the mining of mineral deposits in the dynamics of the development of mining systems (FUWE-2022-0005), reg. №1021062010531-8-1.5.1*

## For citation

Sokolov I.V., Antipin Yu.G., Nikitin I.V., Solomein Yu.M. Substantiation of a Rational Block Bottom Structure at a Combined Mining System of Shallow Deposits of Medium Capacity. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 3, pp. 5-12. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-5-12>

## Введение

Воспроизводство и развитие минерально-сырьевой базы ГМК «Норильский никель» в условиях неуклонного истощения запасов богатых сплошных медно-никелевых руд тесно связано с решениями о вовлечении в эксплуатацию запасов бедных вкрапленных руд [1]. Основные месторождения вкрапленных медно-никелевых руд Норильского горнопромышленного района (Норильск-1, Масловское, Черногорское и др.) представлены пологими залежами (до 15°) преимущественно средней мощности (от 10 до 25 м) при крепких и устойчивых налегающих породах.

В настоящее время для подземной добычи вкрапленных медно-никелевых руд применяется система этажного принудительного обрушения с торцовым выпуском руды и использованием самоходного оборудования [2, 3]. Обладая достоинствами в виде высокой производительности труда и низкой себестоимости

добычных работ, данная система разработки характеризуется высоким удельным объемом подготовительно-нарезных работ (ПНР) и весьма низкими показателями извлечения запасов – потери и разубоживание руды составляют 25-30% и более, что не отвечает основному требованию рационального использования и охраны недр, заключающемуся в обеспечении наиболее полного и комплексного извлечения полезных ископаемых из недр [4, 5].

## Состояние вопроса и постановка задачи

Наиболее перспективным решением проблемы повышения полноты и качества выемки запасов пологих залежей представляется применение комбинированной системы разработки (КСР). Сущность КСР состоит в использовании преимуществ и минимизации недостатков систем разработки различных классов при их сочетании в одном добычном блоке, что

обеспечивает наилучшую адаптацию к изменяющимся горно-геологическим и горнотехническим условиям. В мировой практике имеется достаточно примеров использования КСР на подземных рудниках [6-8].

Обоснованию эффективных вариантов КСР и их параметров применительно к условиям пологих залежей медно-никелевых руд посвящены исследования ИНКОН РАН [9], ИГД СО РАН [10-14] и ИГД УрО РАН [15]. В основе большинства вариантов КСР лежит система с твердеющей закладкой. Высокие затраты на закладочные работы существенно снижают эффективность КСР. Практика показала, что в условиях бедных руд наиболее эффективна комбинация системы с открытым очистным пространством и системы с обрушением.

В работе [12] предложен вариант КСР, сочетающий камерно-столбовую систему и систему с обрушением. На границах блока по кровле и почве залежи проходятся вентиляционно-доставочные выработки, между которыми камерно-столбовой выемкой формируется верхняя и нижняя подсечки. Образованная между ними рудная консоль и налегающие породы поддерживаются временными столбчатыми целиками. Отбойка рудной консоли ведется под предварительно обрушенными налегающими породами. Основным достоинством варианта является возможность селективной выемки запасов руды в почве, кровле и центральной части залежи, различающихся по вещественному составу, обогатимости и ценности. Область его применения – мощные (от 20 до 30 м) пологие залежи.

В работе [13] предложен вариант КСР, сочетающий этажно-камерную систему и систему с обрушением. Вариант предусматривает отработку камер увеличенной ширины под защитой породной консоли с последующим обрушением временных междукамерных целиков (МКЦ). Погашение МКЦ ведется с отставанием от фронта камерной выемки на длину устойчивого зависания консоли совместно с обрушением пород кровли. Обязательным условием погашения МКЦ, исключающим заброс руды в выработанное пространство, является заполнение его налегающими породами на высоту не менее мощности залежи. Вариант реализуется при полевой или рудной подготовке горизонта выпуска руды. Наилучшие показатели извлечения достигаются при полевой траншейной подготовке днища блока (потери – 10-14%, разубоживание – 14-17%) [14]. Область применения варианта – мощные (от 20 до 40 м) пологие залежи.

Авторами разработан вариант КСР, сочетающий этажно-камерную систему и систему этажного обрушения с торцовым выпуском руды, позволяющий интенсифицировать процесс очистной выемки и повысить полноту извлечения запасов [15]. Вариант предусматривает выемку камер увеличенной ширины с последующим принудительным обрушением налегающих пород и отработкой МКЦ технологией этажного обрушения с послойной отбойкой и торцовым выпуском руды. Целесообразно расположение камер и МКЦ длинной стороной по простиранию залежи, что позволяет уменьшить

длину буро-доставочных выработок и повысить эффективность работы погрузо-доставочных машин (ПДМ) на выпуске и доставке руды. Безопасность очистных работ обеспечивается применением ПДМ с дистанционным управлением. Область применения варианта – пологие залежи средней мощности (от 10 до 25 м).

Эффективность КСР обусловлена не только оптимальным соотношением запасов в камерах и целиках [16], но и конструкцией днища блока, определяющей количество горизонтов и основные параметры выпуска руды. Обоснование рациональной конструкции днища блока при КСР пологих залежей средней мощности, обеспечивающей полноту и качество выемки запасов при минимизации затрат на ПНР и очистную выемку, является актуальной научно-технической задачей.

### Результаты исследования и их обсуждение

Рассмотрены три возможные конструкции днища блока при КСР пологих залежей средней мощности: траншейное, плоское и комбинированное (рис. 1). Траншейное днище блока предполагает полевую подготовку горизонта выпуска и доставки руды. Траншеи для выпуска руды из камеры и МКЦ оформляются в подстилающих породах. Для повышения устойчивости выработок выпуска и снижения эксплуатационных затрат на ПНР предусматривается разноразное расположение траншейного штрека камеры и буро-доставочного штрека МКЦ. Углы откосов выпускной траншеи камеры и МКЦ приняты равными соответственно 47 и 65° [17]. Также предусматривается раздельная выемка породы выпускной траншеи и камерных запасов, что позволяет несколько улучшить показатели извлечения руды из камеры [4].

При плоском днище блока все выработки горизонта выпуска и доставки проходятся по руде, что существенно снижает эксплуатационные затраты на ПНР и очистную выемку, а также разубоживание руды при отработке МКЦ. При этом образуются значительные потери отбитой руды на днище МКЦ при выпуске руды под обрушенными породами [18].

Для реализации комбинированного днища блока требуется два горизонта выпуска и доставки руды – рудный горизонт для выемки камер и полевой горизонт для отработки целиков, что увеличивает объем ПНР. При этом увеличивается расстояние между выпускными выработками камеры и МКЦ, что повышает их устойчивость и безопасность очистных работ. А самое главное, обеспечиваются более высокие показатели извлечения руды в целом по блоку за счет выемки камеры и МКЦ в условиях, наиболее благоприятных для выпуска руды.

Выбор рациональной конструкции днища блока при КСР пологих залежей средней мощности осуществляется по критерию максимальной прибыли на 1 т погашаемых балансовых запасов с учетом показателей извлечения руды и эксплуатационных затрат на ПНР и очистную выемку [19, 20].

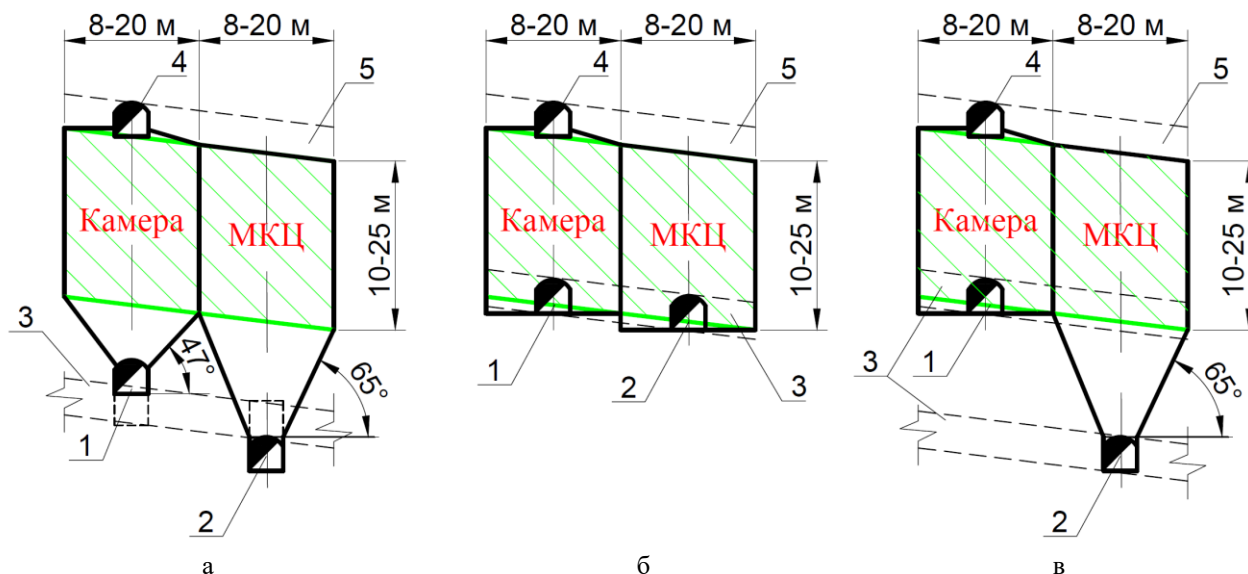


Рис. 1. Конструкция дна блока при КСР пологих залежей средней мощности: а – траншейное днище; б – плоское днище; в – комбинированное днище; 1 – траншейный штрек; 2 – буро-доставочный штрек; 3 – доставочный орт; 4 – буро-вентиляционный штрек; 5 – вентиляционно-буровой орт  
 Fig. 1. The block bottom structure at the combined mining system of shallow deposits of medium capacity: а is a trench bottom; б is a flat bottom; в is a combined bottom; 1 is a trench entry; 2 is a drilling and delivery entry; 3 is a delivery ort; 4 is a drilling and ventilation entry; 5 is a ventilation and drilling ort

На основе экономико-математического моделирования определены потери и разубоживание руды в зависимости от мощности залежи, изменяющейся в интервале от 10 до 25 м, при условии равенства запасов камеры и МКЦ (рис. 2). Геомеханически обоснованные параметры камеры и МКЦ: длина – 76 м; ширина – 8-20 м (в зависимости от мощности залежи); ширина – 10-25 м (равна мощности залежи).

Методика определения потерь и разубоживания руды при КСР учитывает схему подготовки и нарезки запасов блока, особенности технологии очистной выемки и параметры конструктивных элементов КСР и включает следующие возможные источники потерь и разубоживания:

- при отработке камер: потери неотбитой руды и разубоживание пустыми породами при оформлении кровли камеры; потери отбитой руды в днище или на почве камеры и разубоживание от отслоения налегающих пород; разубоживание при формировании траншейного днища камеры;

- при отработке МКЦ: потери и разубоживание при выпуске руды под обрушенными породами с учетом параметров активного сечения при торцовом выпуске и коэффициента разрыхления рудной массы [17].

Установлено, что во всем диапазоне изменения мощности залежи от 10 до 25 м вариант с комбинированным днищем имеет наименьшие потери руды (от 2,5 до 12%), а вариант с плоским днищем – наибольшие (от 33,5 до 35%). При этом вариант с плоским днищем имеет наименьшее разубоживание (от 1,2 до 3,5%), а вариант с траншейным днищем – наибольшее

(от 15 до 21%). Минимальные потери достигаются применением ПДМ с ДУ, в том числе на зачистке почвы камеры, и увеличением угла откосов выпускной траншеи МКЦ до 65°, что наиболее близко к углу истечения рудной массы. Учитывая уровень потерь, извлекаемая ценность добываемой руды по варианту с комбинированным днищем на 30-40% выше, чем по варианту с плоским днищем.

Далее определены эксплуатационные затраты на ПНР и очистную выемку (включая отбойку, выпуск и доставку руды, обрушение налегающих пород) в зависимости от мощности залежи (рис. 3). При моделировании учтены следующие технологические решения, позволяющие повысить эффективность КСР:

- применение на выпуске и доставке руды более производительных, при этом более компактных, аккумуляторных ПДМ грузоподъемностью 18 т (вместо дизельных ПДМ грузоподъемностью 14 т), что позволяет повысить производительность процесса выпуска и доставки руды, уменьшить сечения выработок и удельный объем ПНР по блоку;

- использование при отбойке камерных запасов скважин уменьшенного диаметра (в диапазоне от 64 до 89 мм в зависимости от ширины МКЦ), что позволяет обеспечить качественное формирование и сохранность МКЦ и уменьшить выход негабарита в камере;

- принудительное обрушение налегающих пород осуществляется на открытое пространство, что позволяет существенно увеличить сетку скважин и снизить их удельный расход.



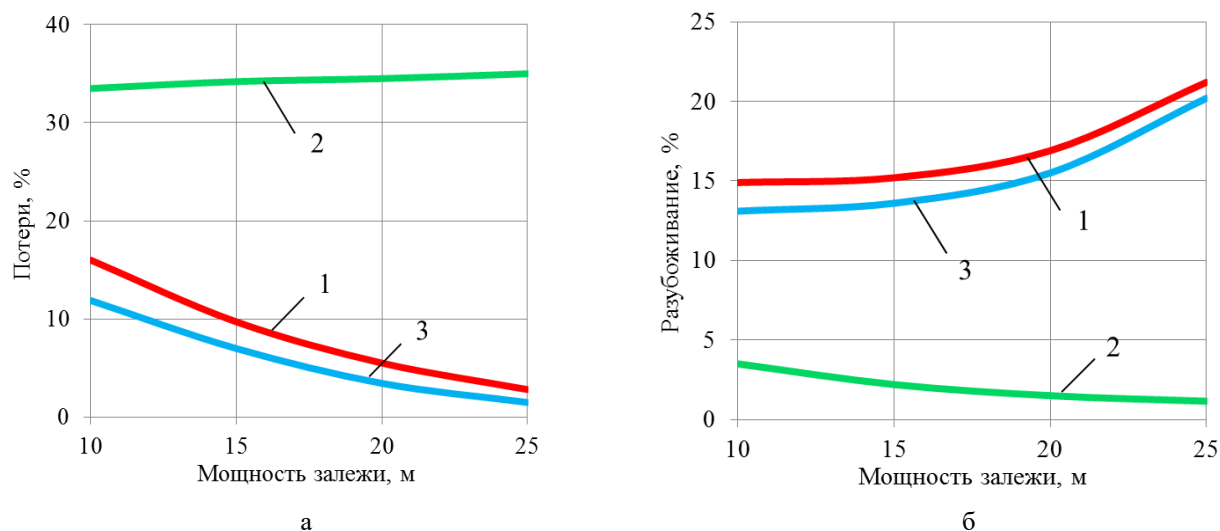


Рис. 2. Зависимости потерь (а) и разубоживания (б) от мощности залежи при различной конструкции днища блока: 1 – траншейное днище; 2 – плоское днище; 3 – комбинированное днище

Fig. 2. Dependences between losses (a) and dilution (б) and capacity of the deposit with different block bottom structures: 1 is a trench bottom; 2 is a flat bottom; 3 is a combined bottom

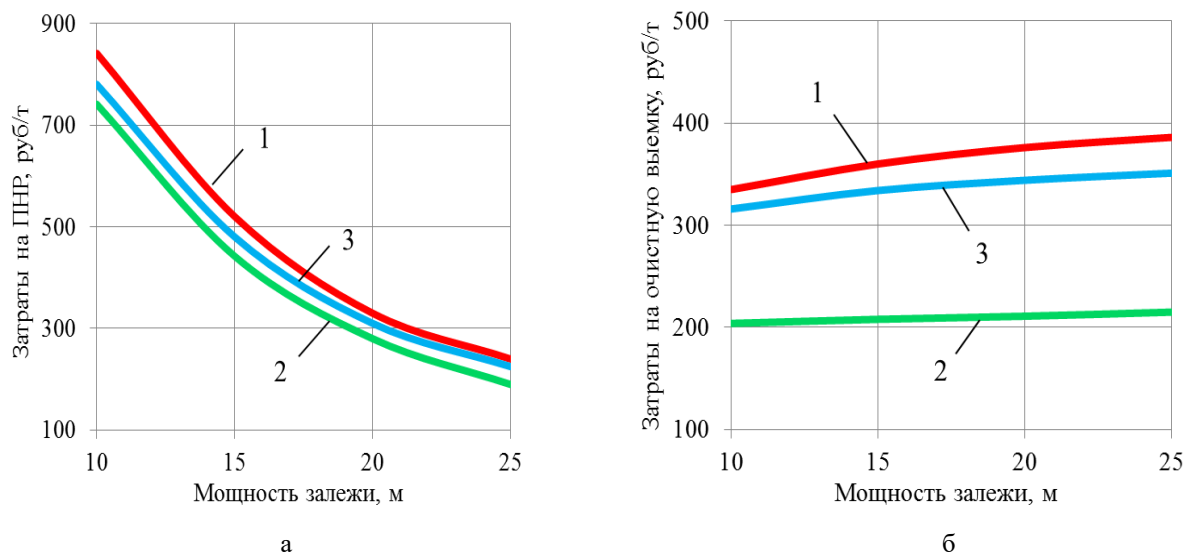


Рис. 3. Зависимости затрат на ПНР (а) и очистную выемку (б) от мощности залежи при различной конструкции днища блока: 1 – траншейное днище; 2 – плоское днище; 3 – комбинированное днище

Fig. 3. Dependences between development and face-entry drivage expenses (a) and stopping (b) and capacity of the deposit with different block bottom structures:

1 is a trench bottom; 2 is a flat bottom; 3 is a combined bottom

Установлено, что во всем диапазоне изменения мощности залежи от 10 до 25 м вариант с плоским днищем имеет наименьшие затраты на ПНР, а вариант с траншейным днищем – наибольшие. Разница небольшая и находится в пределах от 13 до 21%. Это объясняется меньшей длиной вертикальных выработок. Вместе с тем вариант с плоским днищем имеет наименьшие затраты на очистную выемку, а вариант с траншейным днищем – также наибольшие. Разница уже весьма существенная – от 64 до 78%. Это объясняется отсутствием затрат на формирование

породных выпускных траншей. Следует отметить, что затраты на ПНР и очистную выемку по варианту с комбинированным днищем соответственно на 4-8 и 6-10% ниже, чем по варианту с траншейным днищем.

Результаты итоговой оценки эффективности КСР с различной конструкцией днища блока в сравнении с традиционной системой этажного принудительного обрушения с торцовым выпуском руды (при ширине очистной заходки 12,5 м и угле откосов выпускной траншеи 55°) по величине прибыли в зависимости от мощности залежи приведены на рис. 4.

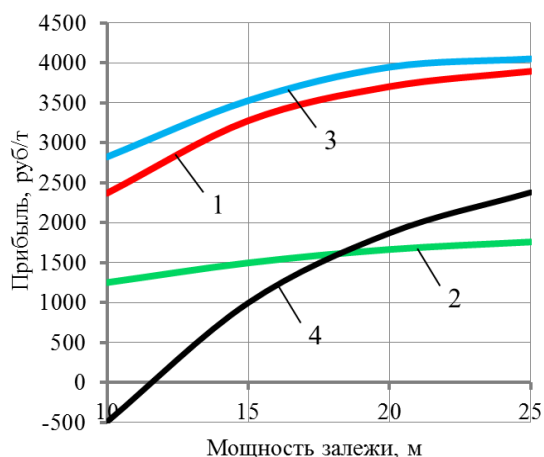


Рис. 4. Зависимость прибыли от мощности залежи при различной конструкции днища блока: 1 – траншейное; 2 – плоское; 3 – комбинированное; 4 – система этажного обрушения с торцовым выпуском руды

Fig. 4. Dependence between profit and capacity of the deposit with different block bottom structures: 1 is a trench bottom; 2 is a flat bottom; 3 is a combined bottom; 4 is a block caving system with frontal ore drawing

Установлено, что максимальную прибыль обеспечивает вариант с комбинированным днищем. Ее величина на 5-20% выше, чем по варианту с траншейным днищем, в 1,3-1,4 раза выше, чем по варианту с плоским днищем, и в 1,7-3,5 раза выше, чем при системе этажного принудительного обрушения с торцовым выпуском руды. Эффект достигается путем повышения полноты (потери – 3-12%) и качества (разубоживание – 13-20%) извлечения комплексных руд при минимизации затрат на ПНР и очистную выемку за счет применения более производительных и компактных ПДМ, использования скважин уменьшенного диаметра при отбойке камерных запасов, увеличения сетки скважин при отбойке налегающих пород.

### Заключение

Выполнены исследования по обоснованию рациональной конструкции днища блока при КСР, сочетающей этажно-камерную систему и систему этажного обрушения с торцовым выпуском руды, в условиях пологих залежей средней мощности. В результате исследований установлено, что рациональным является комбинированное днище блока (камера с плоским днищем и МКЦ с траншейным днищем), обеспечивающее наилучшие показатели извлечения при минимальных затратах на ПНР и очистную выемку.

### Список источников

1. Лежнин А.А., Терновой В.В., Шамшев А.В. Развитие минерально-сырьевой базы ГМК «Норильский никель» в проектных разработках института Гипроникель // Горный журнал. 2010. №5. С. 74-77.

2. Малиновский Е.Г., Голованов А.И., Ахпашев Б.А. Исследования влияния гранулометрического состава отбитой рудной массы на показатели извлечения при системе этажного принудительного обрушения руды физическим моделированием // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2022. №3 (151). С. 41-53. DOI: 10.26730/1999-4125-2022-3-41-53
3. Сравнение результатов физического моделирования и натурного эксперимента по торцовому выпуску руды при системе этажного принудительного обрушения для пологих залежей / Е.Г. Малиновский, Б.А. Ахпашев, А.И. Голованов, А.М. Гильдеев // Известия вузов. Горный журнал. 2019. №7. С. 34-44. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-7-34-44
4. Исследование влияния показателей извлечения на эффективность подземной отработки месторождений бедных комплексных руд / Ю.Г. Антипин, К.В. Барановский, А.А. Рожков, И.В. Никитин, Ю.М. Солломеин // Горная промышленность. 2022. №S1. С. 46-52. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-46-52
5. Яковлев В.Л. О методологии комплексного освоения запасов месторождений твердых полезных ископаемых для разработки стратегии развития минерально-сырьевой базы России // Известия вузов. Горный журнал. 2020. №7. С. 5-20. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-7-5-20
6. Обзор комбинированных систем подземной разработки рудных месторождений / Ю.Г. Антипин, К.В. Барановский, А.А. Рожков, М.В. Ключев // Проблемы недропользования. 2020. №3 (26). С. 5-22. DOI: 10.25635/2313-1586.2020.03.005
7. Franco A., Vieira R., Bunting R. The Panasqueira mine at a glance // Tungsten. 2014, vol. 3, pp. 1-12.
8. Esterhuizen G.S., Dolinar D.R., Ellenberger J.L. Pillar strength in underground stone mines in the United States // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2011, vol. 48, no. 1, pp. 42-50. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2010.06.003
9. Айнбиндер И.И., Пацкевич П.Г., Овчаренко О.В. Перспективы развития геотехнологий подземной добычи руд на глубоких рудниках Талнахского и Октябрьского месторождений // Горная промышленность. 2021. №5. С. 70-75. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-5-70-75
10. Развитие ресурсосберегающих геотехнологий разработки мощных пологопадающих залежей полиметаллических руд в условиях Норильска / А.П. Тапсиев, А.М. Фрейдин, В.А. Усков, А.Н. Анушенков, П.А. Филиппов, А.А. Неверов, С.А. Неверов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2014. №5. С. 123-136.
11. Фрейдин А.М., Неверов А.А., Неверов С.А. Геомеханическая оценка комбинированной системы разработки мощных пологих рудных залежей с закладкой и обрушением // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2016. №5. С. 114-124.

12. Обоснование параметров камерно-столбовой выемки с регулярным извлечением целиков и обрушением пород кровли в условиях больших глубин / А.А. Неверов, Д.П. Семенов, С.А. Неверов, А.М. Никольский, М.В. Тишков // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2018. №1. С. 5-13. DOI: 10.26730/1999-4125-2018-1-5-13
13. Неверов А.А. Геомеханическое обоснование нового варианта камерной выемки пологих мощных залежей с выпуском руды из подконсольного пространства // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2012. №6. С. 99-109.
14. Обоснование конструкций днищ блоков при системах разработки с камерно-целиковым порядком выемки / А.М. Никольский, С.А. Неверов, А.А. Неверов, М.В. Тишков, Д.П. Семенов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2018. №4. С. 36-44.
15. Обоснование конструкции и параметров комбинированной системы разработки пологой залежи бедных комплексных руд / И.В. Соколов, Ю.Г. Антипин, И.В. Никитин, Р.В. Криницын // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. №5-1. С. 88-104. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-51-0-88
16. Соколов И.В., Барановский К.В. Выбор эффективной технологии подземной разработки месторождения кварца // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. №2. С. 10-17.
17. Смирнов А.А., Барановский К.В., Дьячков П.С. Система поэтажного обрушения с торцовым выпуском для выемки целиков при отработке пологих рудных тел // Проблемы недропользования. 2023. №4 (39). С. 6-15. DOI: 10.25635/2313-1586.2023.04.006
18. Савич И.Н., Мустафин В.И. Перспективы применения и обоснование проектных решений при этажном и поэтажном торцевом выпуске руды // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. №S1. С. 419-429.
19. Влияние показателей извлечения на эффективность технологии подземной разработки рудных месторождений / И.В. Соколов, А.А. Смирнов, Ю.Г. Антипин, Р.И. Соколов // Известия вузов. Горный журнал. 2012. №3. С. 4-11.
20. Balt K., Goosen R.L. MSAHP: An approach to mining method selection // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2020, vol. 120, no. 8, pp. 451-460. DOI: 10.17159/2411-9717/1072/2020
- granulometric composition of the broken ore mass on the extraction indicators with a system of forced block caving of ore. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Kuzbass State Technical University]. 2022;(3(151)):41-53. (In Russ.) DOI: 10.26730/1999-4125-2022-3-41-53
3. Malinovsky E.G., Akhпасhev B.A., Golovanov A.I., Gildeev A.M. Comparing the results of physical modeling and full-scale experiment on ore face draw in the system of block caving for flat deposits. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal* [News of Higher Institutions. Mining Journal]. 2019;(7):34-44. (In Russ.) DOI: 10.21440/0536-1028-2019-7-34-44
4. Antipin Yu.G., Baranovsky K.V., Rozhkov A.A., Nikitin I.V., Solomein Yu.M. Study on the influence of recovery indicators on efficiency of underground mining of deposits of low-grade complex ores. *Gornaya promyshlennost* [Russian Mining Industry]. 2022;(S1):46-52. (In Russ.) DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-46-52
5. Yakovlev V.L. Solid mineral deposits integrated development methodology for Russian mineral resource base development strategy. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal* [News of Higher Institutions. Mining Journal]. 2020;(7):5-20. (In Russ.) DOI: 10.21440/0536-1028-2020-7-5-20
6. Antipin Yu.G., Baranovsky K.V., Rozhkov A.A., Klyuev M.V. Overview of combined underground mining systems. *Problemy nedropolzovaniya* [Problems of Subsoil Use]. 2020;(3(26)):5-22. (In Russ.) DOI: 10.25635/2313-1586.2020.03.005
7. Franco A., Vieira R., Bunting R. The Panasqueira mine at a glance. *Tungsten*. 2014;3:1-12.
8. Esterhuizen G.S., Dolinar D.R., Ellenberger J.L. Pillar strength in underground stone mines in the United States. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2011;48(1):42-50. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2010.06.003
9. Aynbinder I.I., Patskevich P.G., Ovcharenko O.V. Prospects for the development of underground ore mining geotechnologies at the Talnakh and Oktyabrskoe deep mines. *Gornaya promyshlennost* [Russian Mining Industry]. 2021;(5):70-75. (In Russ.) DOI: 10.30686/1609-9192-2021-5-70-75
10. Tapsiev A.P., Freidin A.M., Uskov V.A., Anushenkov A.N., Filippov P.A., Neverov A.A., Neverov S.A. Resource-saving geotechnologies for thick gently dipping complex ore deposits in the Norilsk region. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh* [Journal of Mining Science]. 2014;(5):123-136. (In Russ.)
11. Freidin A.M., Neverov A.A., Neverov S.A. Geomechanical evaluation of a combined system for the development of thick flat ore deposits with backfilling and caving. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh* [Journal of Mining Science]. 2016;(5):114-124. (In Russ.)

### References

1. Lezhnin A.A., Ternovoi V.V., Shamshev A.V. Development of mineral-raw-material base of JSC "MMC "Norilsk Nickel" in new project design of Gipronickel Institute. *Gornyy zhurnal* [Mining Journal]. 2010;(5):74-77. (In Russ.)
2. Malinovsky E.G., Golovanov A.I., Akhпасhev B.A. Physical modeling studies on the influence of the

12. Neverov A.A., Semenov D.P., Neverov S.A., Nikolsky A.M., Tishkov M.V. Substantiation of parameters of room-and-pillar mining with regular extraction of pillars and roof caving at great depth. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Kuzbass State Technical University]. 2018;(1):5-13. (In Russ.) DOI: 10.26730/1999-4125-2018-1-5-13
13. Neverov A.A. Geomechanical substantiation of modified room-work in flat thick deposits with ore drawing under overhang. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh* [Journal of Mining Science]. 2012;(6):99-109. (In Russ.)
14. Nikolsky A.M., Neverov S.A., Neverov A.A., Tishkov M.V., Semenov D.P. Evaluation of bottom designs for extraction blocks in room-and-pillar mining. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskyy zhurnal)* [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. 2018;(4):36-44. (In Russ.)
15. Sokolov I.V., Antipin Yu.G., Nikitin I.V., Krinitsyn R.V. Substantiation of the design and parameters of the combined system for the development of a shallow deposit of low-grade complex ores. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskyy zhurnal)* [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. 2021;(5-1):88-104. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236-1493-2021-51-0-88
16. Sokolov I.V., Baranovsky K.V. Choosing an efficient technique for underground mining of quartz. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016;(2):10-17. (In Russ.)
17. Smirnov A.A., Baranovsky K.V., Dyachkov P.S. A sublevel caving system with frontal ore drawing for excavating pillars of sloping ore deposits. *Problemy nedropolzovaniya* [Problems of Subsoil Use]. 2023;(4(39)): 6-15. (In Russ.) DOI: 10.25635/2313-1586.2023.04.006
18. Savich I.N., Mustafin V.I. Perspectives of use and rationale design solutions of block (level) and sublevel ore drawing. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskyy zhurnal)* [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. 2015;(S1):419-429. (In Russ.)
19. Sokolov I.V., Smirnov A.A., Antipin Yu.G., Sokolov R.I. Influence of extraction indicators on efficiency of underground mining technology of ore deposits. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal* [News of Higher Institutions. Mining Journal]. 2012;(3):4-11. (In Russ.)
20. Balt K., Goosen R.L. MSAHP: An approach to mining method selection. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2020;120(8):451-460. DOI: 10.17159/2411-9717/1072/2020

Поступила 29.02.2024; принята к публикации 29.04.2024; опубликована 30.09.2024  
Submitted 29/02/2024; revised 29/04/2024; published 30/09/2024

**Соколов Игорь Владимирович** – доктор технических наук, директор, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия.  
Email: direct@igduran.ru. ORCID 0000-0001-7841-5319

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

**Никитин Игорь Владимирович** – научный сотрудник лаборатории подземной геотехнологии, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия. Email: opening-kp@yandex.ru. ORCID 0000-0002-3593-4319

**Соломенн Юрий Михайлович** – научный сотрудник лаборатории подземной геотехнологии, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия. Email: yuriysolo@mail.ru. ORCID 0000-0002-8226-6894

**Igor V. Sokolov** – DrSc (Eng.), Director, Institute of Mining, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia.  
E-mail: direct@igduran.ru. ORCID 0000-0001-7841-5319

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

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

**Yuri M. Solomein** – Researcher of the Underground Geotechnology Laboratory, Institute of Mining, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia.  
E-mail: yuriysolo@mail.ru. ORCID 0000-0002-8226-6894

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)  
УДК 622.882:622.2  
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-3-13-21



## ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОСВОЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЯ С УЧЕТОМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ ПУСТОТ НЕДР

Славиковская Ю.О.

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

**Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы).** Деятельность горнодобывающего предприятия сопряжена с крупномасштабным негативным воздействием на недра в связи с добычей полезного ископаемого и образующихся вследствие этого техногенных пустот недр, что приводит к существенному негативному воздействию на все элементы природной среды. Указанные негативные воздействия сопровождаются трансформацией природной среды, выражающейся в загрязнении и ухудшении химического состава атмосферного воздуха и водных ресурсов, отчуждении, нарушении и загрязнении земель, что в целом приводит к существенным экономическим потерям в связи с необходимостью компенсации нанесенного вреда. При этом необходимо учитывать, что техногенные пустоты недр наряду с тем, что оказывают отрицательное воздействие, также могут быть использованы в качестве ресурса. В целях минимизации наносимого вреда и для выбора направления их использования необходимо проводить соответствующие сравнительные экономические оценки еще на стадии проектирования освоения месторождения. Что предопределяет необходимость включения в методику экономической оценки эффективности освоения месторождения дополнительных показателей экономической стоимости вреда, наносимого в результате образования техногенных пустот в процессе разработки месторождения. **Цель работы.** На основе сравнительной оценки вариантов освоения месторождения с учетом параметров техногенных пустот и эколого-экономической эффективности их использования обоснована необходимость выбора направления их использования на стадии проектирования освоения месторождения. **Результат.** Установлено, что наряду с традиционными показателями экономической эффективности освоения месторождения также необходимо использовать критерий наносимого вреда в стоимостном выражении.

**Ключевые слова:** месторождения полезных ископаемых, техногенные пустоты недр, горнодобывающее предприятие, негативное воздействие на окружающую среду, экономическая оценка освоения месторождения, оценка стоимости вреда, наносимого окружающей среде

*Статья подготовлена в рамках Госзадания № 075-00412-22 ПР. Тема 2 (2022-2024). Разработка геотехнологий оценки защищенности горнопромышленных территорий и прогноза развития негативных процессов в недропользовании (FUWE-2022-0002) (рег. №1021062010532-7-1.5.1).*

© Славиковская Ю.О., 2024

### Для цитирования

Славиковская Ю.О. Экономическая оценка эффективности освоения месторождения с учетом использования техногенных пустот недр // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №3. С. 13-21. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-13-21>



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

# ECONOMIC ASSESSMENT OF FIELD DEVELOPMENT EFFICIENCY FACTORING INTO THE USE OF MAN-CAUSED SUBSOIL VOIDS

Slavikovskaya Yu.O.

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

**Abstract. Problem Statement (Relevance).** The activities of mining enterprises are associated with a large-scale negative impact on the subsoil due to the extraction of minerals and the resulting man-caused subsoil voids, leading to a significant negative impact on all elements of the natural environment. These negative impacts are accompanied by the transformation of the natural environment in pollution and deterioration of the chemical composition of atmospheric air and water resources, alienation, disturbance and pollution of land, in general leading to significant economic losses due to the need to compensate for damage caused. At the same time, it should be noted that man-caused subsoil voids, along with the negative impact, can also be used as a resource. To minimize the damage caused and choose the area of their use, it is required to carry out an appropriate comparative economic assessment at the stage of the field development design. This predetermines the need to include additional indicators of the economic cost of damage, as a result of the formation of man-caused voids during field development, in the methodology of such economic assessment of efficiency of field development. **Objectives.** The research is aimed at using a comparative assessment of field development options, factoring into the parameters of man-caused voids and the environmental and economic efficiency of their use, to provide a rationale for the need to choose the area of their use at the stage of the field development design. **Result.** It has been found that in addition to conventional indicators of economic efficiency of field development, it is also necessary to use the criterion of damage caused in value terms.

**Keywords:** mineral deposits, man-caused subsoil voids, mining enterprise, negative impact on the environment, economic assessment of field development, assessment of the cost of environmental damage

*The article was prepared as part of State Assignment No. 075-00412-22 ПП. Subject 2 (2022-2024). Developing geoinformation technologies to assess protection of mining areas and predict development of negative processes in subsoil use (FUWE-2022-0002) (Reg. No.1021062010532-7-1.5.1).*

## For citation

Slavikovskaya Yu.O. Economic Assessment of Field Development Efficiency Factoring into the Use of Man-Caused Subsoil Voids. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 3, pp. 13-21. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-13-21>

## Введение

В современной практике одним из основных индикаторов, отражающих последствия негативного воздействия любого предприятия, в том числе и горнодобывающего на окружающую среду, является показатель вреда как в натуральном, так и стоимостном выражении.

В статье на основе анализа современных исследований по вопросу использования техногенных пустот, образующихся при добыче полезных ископаемых, и о возможных направлениях их использования [24-34] представлены результаты комплексной экономической оценки освоения месторождения при одновременном использовании образуемых техногенных пустот в интересах горнодобывающего предприятия с учетом стоимостной оценки как наносимого, так и компенсируемого вреда окружающей среде.

## Материалы и методы исследования

Как правило, оценка экономической эффективности освоения месторождения полезных ископаемых осуществляется на основе «Методических рекомен-

даций по оценке эффективности инвестиционных проектов» [23]. Однако, как было установлено ранее выполненными исследованиями, в рамках данных методических рекомендаций не уделяется должного внимания оценке вреда, наносимого окружающей среде в результате деятельности предприятия [6].

На стадии проектирования и на стадии реализации проекта в условиях горнодобывающего предприятия в процессе выбора технологических решений рекомендуется, наряду с привычными технико-экономическими показателями, руководствоваться показателями оценки вреда в денежном выражении в результате возможных и оказываемых негативных воздействий на окружающую среду, с этой целью применяют действующую официально утвержденную нормативно-правовую и методическую базу [7-22]. Согласно существующим методикам [1-4], а также действующим нормативным документам [7-22, 35] в результате деятельности горнодобывающего предприятия происходит загрязнение окружающей среды, представляющее собой процесс, при котором в окружающую среду выпускаются вещества, чьи свойства,

местоположение или количество оказывают негативное воздействие на природу, а в ряде случаев приводящее к разрушению экосистемы [5]. Таким образом, окружающей среде наносится вред, приводящий к негативным изменениям в природной среде, что, в свою очередь, влечет за собой деградацию естественных экосистем и истощение природных ресурсов [5].

Применительно к предприятиям горнопромышленного комплекса ранее в работе [6] была представлена методология оценки вреда в стоимостном выражении на основе комплексного подхода с учетом негативного воздействия на недра в результате вновь создаваемых техногенных пустот недр.

В данной работе в соответствии с целями и задачами исследования была выполнена оценка вреда в стоимостном выражении, наносимого окружающей

среде в результате разработки месторождения в привязке к параметрам образующихся техногенных пустот и направлениям его компенсации.

На основе анализа и обобщения действующих методических рекомендаций был разработан порядок оценки вреда в стоимостном выражении, наносимый окружающей среде применительно к техногенным пустотам недр, образующихся при разработке месторождений полезных ископаемых, который можно описать блок-схемой, представленной на рис. 1. Данная схема является унифицированной. Не обязательно, что горнодобывающее предприятие при осуществлении деятельности наносит все виды вреда, из приведенного перечня данные показатели применяются ситуационно в зависимости от направления негативного воздействия.

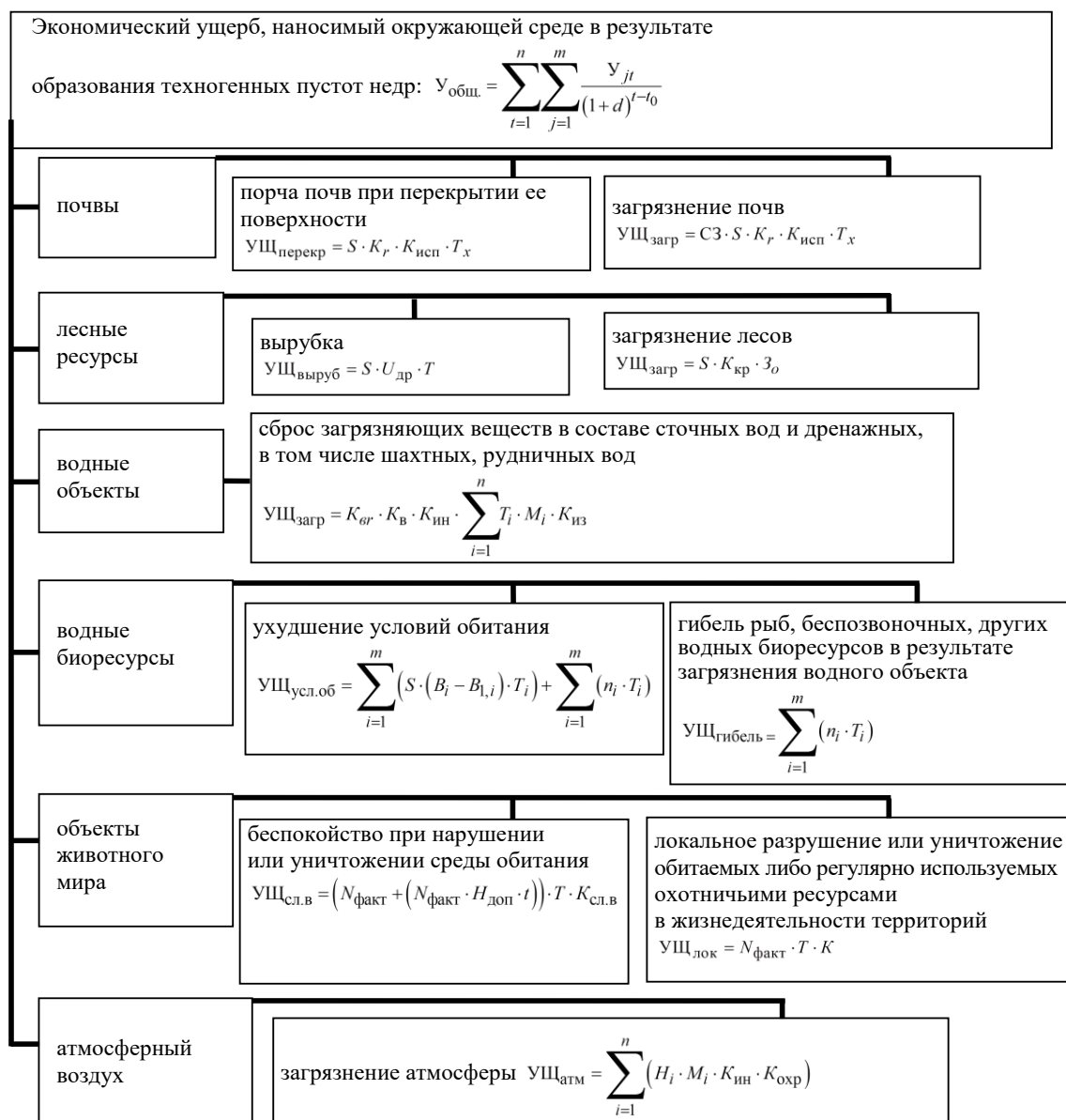


Рис. 1. Блок-схема оценки вреда в стоимостном выражении, наносимого окружающей среде в результате образования техногенных пустот

Fig. 1. A block diagram of assessment environmental damage from man-caused subsoil voids in value terms

Показатели, используемые в данной блок-схеме на **рис. 1**:  $У_{\text{общ}}$  – суммарный вред, наносимый горнодобывающим предприятием окружающей среде в процессе образования техногенных пустот, млн руб.,  $t = 1, \dots, n$  – период оценки, лет;  $j = 1, \dots, m$  – элементы природной среды, на которые оказывается негативное воздействие;  $d$  – норма дисконта;  $У_{ij}$  – вред, наносимый элементу окружающей среды в расчетном периоде, млн руб., который определяется путем суммирования следующих составляющих:

– вред почвам:  $УЩ_{\text{перекр}}$ ,  $УЩ_{\text{загр}}$  – суммарный размер вреда по направлению воздействия, руб.;  $S$  – площадь нарушенного земельного участка,  $\text{м}^2$ ;  $K_r$ ,  $K_{\text{исп}}$  – показатели, учитывающие качество земель и интенсивность загрязнения;  $T_x$  – такса для исчисления размера вреда;  $C3$  – степень загрязненности земель;  $S$  – площадь участка, подвергшегося негативному воздействию, га;

– вред, нанесенный лесным ресурсам:  $УЩ_{\text{выруб}}$ ,  $УЩ_{\text{загр}}$  – суммарный размер вреда лесным ресурсам, тыс. руб.;  $S$  – площадь нарушенных лесных насаждений, га;  $U_{\text{др}}$  – качественные характеристики участка нарушенного лесного массива 1 га,  $\text{м}^3$ ;  $T$  – ставка платы за кубометр древесины, руб.;  $K_{\text{кр}}$  – коэффициент индексации природоохранных затрат;  $Z_0$  – затраты природоохранного назначения, руб.;

– вред, наносимый водным объектам:  $УЩ_{\text{загр}}$  – размер наносимого вреда в стоимостном выражении, тыс. руб.;  $K_{\text{вр}}$ ,  $K_v$  – коэффициенты, учитывающие природно-климатические и экологические факторы;  $K_{\text{ин}}$  – коэффициент индексации стоимостных показателей;  $T_i$  – такса, применяемая при исчислении вреда в стоимостном выражении, тыс. руб./т;  $M_i$  – масса сброшенных загрязняющих веществ, т;  $K_{\text{из}}$  – коэффициент интенсивности воздействия загрязняющих веществ;  $i = 1, \dots, n$  – количество загрязняющих веществ, сброшенных в водный объект;

– вред, наносимый водным биоресурсам:  $УЩ_{\text{улс.об}}$ ,  $УЩ_{\text{гибель}}$  – размер вреда водным биоресурсам, руб.;  $i = 1, \dots, m$  – видовой состав водных биоресурсов;  $S$  – площадь водного объекта, подвергшегося негативному воздействию со стороны горного предприятия, га;  $V_r$ ,  $V_{1,i}$  – показатели качественных характеристик водного объекта;  $T_i$  – размер таксы, используемый для перевода натуральных показателей в стоимостные, руб.;  $n_i$  – численность водных биоресурсов, теряемых в результате негативного воздействия по видам, шт.;

– вред, наносимый объектам животного мира:  $УЩ_{\text{сл.в}}$ ,  $УЩ_{\text{шок}}$  – размер вреда, наносимый объектам

животного мира, тыс. руб.;  $N_{\text{факт}}$  – фактическая численность объектов животного мира, обитающих на территории подверженной негативному воздействию, шт.;  $N_{\text{доп}}$  – норматив допустимого изъятия, %;  $T$  – такса для исчисления размера вреда в денежном выражении, руб.;  $t$  – период времени негативного воздействия, лет;  $K_{\text{сл.в}}$  – безразмерный коэффициент пересчетный, учитывающий интенсивность воздействия на территорию;

– вред, наносимый атмосферному воздуху:  $УЩ_{\text{атм}}$  – размер вреда, наносимый в результате превышения нормативов допустимых выбросов загрязняющих веществ, руб.;  $M_i$  – фактическая масса выброса, т;  $N_i$  – такса расчета размера вреда в стоимостном выражении, руб./т;  $K_{\text{охр}}$  – коэффициент, характеризующий режим охраны территории;  $K_{\text{ин}}$  – коэффициент индексации стоимостных показателей;  $i$  – загрязняющее вещество, по которому исчисляется размер вреда;  $n$  – количество загрязняющих веществ, поступающих в атмосферный воздух [7-22].

### Полученные результаты и их обсуждение

В качестве примера представлены результаты оценки эколого-экономической эффективности месторождений нерудного сырья, имеющих схожее зонально-географическое положение. Оценка выполнена на стадии проектирования освоения месторождения.

Месторождение 1 – полевошпатовое сырье, отрабатывается открытым способом с применением двухбортовой углубочной системы разработки с перемещением пустых пород во внешние отвалы, ресурсный потенциал техногенных пустот недр не используется, вред окружающей среде рассчитан в результате отчуждения лесных угодий под размещение внешних отвалов.

Месторождение 2 – трепелов и опок, также отрабатывается открытым способом с применением сплошной однобортовой транспортной системы разработки с использованием ресурсного потенциала техногенных пустот для складирования вскрыши во внутренний отвал, также в этом отвале размещаются и твердые промышленные отходы предприятия (V класс опасности). Результаты выполненных расчетов представлены в **табл. 1** и на **рис. 2**.

Графически данные показатели и их динамика с учетом фактора времени, а также с учетом компенсируемого вреда на основе использования техногенных пустот как товарного продукта представлены на **рис. 2**.



Таблица 1. Основные технико-экономические показатели освоения месторождений с компенсацией вреда в денежном выражении и с компенсацией вреда за счет использования образованных пустот  
 Table 1. Main technical and economic indicators of field development, including the compensation for damage in monetary terms and the compensation for damage by using the resulting voids

Наименование	Показатели эффективности освоения месторождения *	
	Месторождение 1 – с компенсацией вреда в денежном выражении	Месторождение 2 – с компенсацией вреда за счет использования образованных пустот
Производительность карьера по руде, тыс. т	900	320
Удельные капитальные затраты, руб./т	1283,77	708,75
Затраты на 1 т добытого полезного ископаемого, руб./т	261,1	138,0
NPV, млн руб.	107,5	125,53
Срок окупаемости, лет	9,5	5,3
Показатель рентабельности, %	8,3	10,5
Размер вреда в стоимостном выражении, млн руб.	41,2	–

\*При выполнении расчетов принята фиксированная цена добываемого сырья.

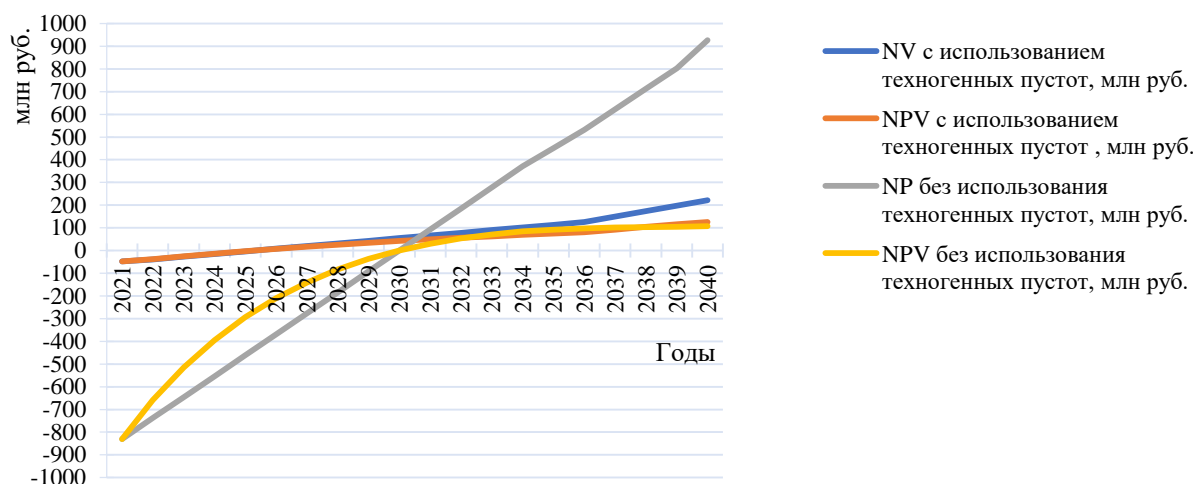


Рис. 2. Показатели эффективности освоения месторождения 1 с учетом компенсации наносимого вреда в денежном выражении и месторождения 2 с учетом использования техногенных пустот недр

Fig. 2. Efficiency of development of field 1, factoring into the compensation for damage in monetary terms, and field 2, factoring into the use of man-caused subsoil voids

### Заключение

Таким образом, выполненными исследованиями установлено, что использование техногенных пустот в качестве полигонов размещения отходов, образующихся на горном предприятии, является экономически целесообразным, а также ведет к минимизации вреда, а следовательно, и его разрушительных последствий для окружающей среды территории размещения горного предприятия.

В целом новизна предложенного подхода заключается в смене критерия с экономической эффективности на критерий эколого-экономической целесообразности, что достигается путем оценки и учета вреда в стоимостном выражении в общих показателях экономической

эффективности. Подобного рода оценки становятся более актуальными, поскольку горнодобывающее предприятие является источником интенсивного негативного воздействия на окружающую среду на всех этапах освоения месторождения, и территории их размещения характеризуются высоким уровнем урбанизации, что предопределяет повышенное внимание к экологической составляющей.

### Список источников

1. Рюмина Е.В. Экономический анализ ущерба от экологических нарушений. М.: Наука, 2009. 331 с.
2. Реймерс Н.Ф. Природопользование: словарь-справочник. М.: Мысль, 1990. 637 с.

3. Временная типовая методика определения экономической эффективности осуществления природоохранных мероприятий и оценки экономического ущерба, причиняемого народному хозяйству загрязнением окружающей среды / Госплан СССР, Госстрой СССР, Президиум АН СССР. М.: Экономика, 1986. 95 с.
4. Райзберг Б.А. Современный экономический словарь. М.: ИНФРА-М, 2002. 480 с.
5. Об охране окружающей среды: ФЗ от 10 января 2002 г., №7-ФЗ // Информ. справочный бюл. 17.09.2002. №155. 60 с.
6. Славиковская Ю.О., Рудакова Л.В., Рудаков Р.Б. Оценка последствий техногенного воздействия предприятий горнопромышленного комплекса на окружающую среду // Журнал экономической теории. 2016. №4. С. 124-137.
7. Лесной кодекс Российской Федерации от 04.12.2006 г. №200-ФЗ // Российская газета. Федеральный выпуск №4243. 8 декабря 2006.
8. Водный кодекс Российской Федерации от 3 июня 2006 г. № 74-ФЗ // Российская газета от 8 июня 2006 г. №121.
9. Федеральный закон от 20 декабря 2004 г. №166-ФЗ «О рыболовстве и сохранении водных биологических ресурсов» // Парламентская газета от 23 декабря 2004 г. №241.
10. Федеральный закон от 24 апреля 1995 г. №52-ФЗ «О животном мире» // Российская газета от 4 мая 1995 г.
11. Методика исчисления размера вреда, причиняемого почвам как объекту охраны окружающей среды: утв. Приказом Мин-ва природных ресурсов и экологии от 08.07.2010 №38 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.garant.ru> (дата обращения 12.04.2022)
12. Приказ Минприроды России от 11.07.2018 №316 «О внесении изменений в Методику исчисления вреда, причиненного почвам как объекту охраны окружающей среды, утвержденную приказом Минприроды России от 8 июля 2010 г. № 238» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71916348/> (дата обращения 12.04.2022)
13. Постановление Правительства РФ от 29.12.2018 №1730 «Об утверждении особенностей возмещения вреда, причиненного лесам и находящимся в них природным объектам вследствие нарушения лесного законодательства» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72041810/> (дата обращения 12.04.2022)
14. Постановление Правительства РФ от 22.05.2007 №310 (ред. от 06.01.2020) «О ставках платы за единицу объема лесных ресурсов и ставках платы за единицу площади лесного участка, находящегося в федеральной собственности» [Электронный ресурс]. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_law68813/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_law68813/) (дата обращения 12.04.2022)
15. Приказ Минприроды России от 13.04.2009 №87 (ред. от 26.08.2015) «Об утверждении Методики исчисления размера вреда, причиненного водным объектам вследствие нарушения водного законодательства» [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902159034> (дата обращения 12.04.2022)
16. Приказ Минсельхоза России от 31.03.2020 №167 «Об утверждении Методики исчисления размера вреда, причиненного водным биологическим ресурсам» [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/564859759> (дата обращения 12.04.2022)
17. Федеральный закон №166-ФЗ от 20.12.2004 «О рыболовстве и сохранении водных биологических ресурсов» [Электронный ресурс]. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_50799/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_50799/) (дата обращения 12.04.2022)
18. Постановление Правительства РФ №1321 от 03.11.2018 «Об утверждении такс для исчисления размера ущерба, причиненного водным биологическим ресурсам» [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru/72099272/> (дата обращения 12.04.2022)
19. Приказ Минприроды России от 08.12.2011 №948 «Об утверждении Методики исчисления размера вреда, причиненного охотничьим ресурсам» [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru/70132926/> (дата обращения 12.04.2022)
20. Приказ МПР РФ от 28 апреля 2008 г. №107 «Об утверждении Методики исчисления размера вреда, причиненного объектам животного мира, занесенным в Красную книгу Российской Федерации, а также иным объектам животного мира, не относящимся к объектам охоты и рыболовства и среде их обитания» [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru/12161284/> (дата обращения 12.04.2022)
21. Приказ Минприроды России от 25.11.2020 №965 «Об утверждении нормативов допустимого изъятия охотничьих ресурсов и нормативов численности охотничьих ресурсов в охотничьих угодьях» [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573053302> (дата обращения 12.04.2022)
22. Постановление Правительства РФ от 22.05.2007 №310 (ред. от 06.01.2020) «О ставках платы за единицу объема лесных ресурсов и ставках платы за единицу площади лесного участка, находящегося в федеральной собственности» [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru/12153804/> (дата обращения 12.04.2022)
23. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов: офиц. изд., 2-я ред. М.: Экономика, 2000. 421 с.
24. Каплунов Д.Р., Радченко Д.Н. Технологические процессы и схемы формирования выработанных пространств для реализации полного цикла комплексного освоения рудных месторождений // Проблемы и перспективы комплексного освоения

- и сохранения земных недр: тезисы докладов II Международной научной школы академика К.Н. Трубецкого, Москва, 20-24 июня 2016 года. М.: Институт проблем комплексного освоения недр РАН, 2016. С. 274-276.
25. Каплунов Д.Р., Радченко Д.Н., Лавенков В.С. Условия безопасного и экологически сбалансированного формирования выработанных пространств земных недр при комплексном освоении месторождений твердых полезных ископаемых // Комбинированная геотехнология: устойчивое и экологически сбалансированное освоение недр, Магнитогорск, 25-29 мая 2015 года. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2015. С. 20-21.
  26. Эффективные технологии использования техногенных георесурсов – основа экологической безопасности освоения недр / К.Н. Трубецкой, В.Н. Захаров, Д.Р. Каплунов, М.В. Рьльникова // Горный журнал. 2016. №5. С. 34-40. DOI: 10.17580/gzh.2016.05.03
  27. Каплунов Д.Р., Радченко Д.Н. Выработанные пространства недр: принципы многофункционального использования в полном цикле комплексного освоения месторождений твердых полезных ископаемых // Горный журнал. 2016. №5. С. 28-33. DOI: 10.17580/gzh.2016.05.02
  28. Каплунов Д.Р., Радченко Д.Н. Принципы проектирования и выбор технологий освоения недр, обеспечивающих устойчивое развитие подземных рудников // Горный журнал. 2017. №11. С. 52-59. DOI: 10.17580/gzh.2017.11.10
  29. Каплунов Д.Р., Юков В.А. О принципах перехода горнодобывающего предприятия к устойчивому экологически сбалансированному развитию // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. №3. С. 74-86. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-3-0-74-86. EDN QIZEUU.
  30. Актуальные геотехнологии подземной добычи руд, проблемы устойчивого развития и перехода к новому технологическому укладу / Д.Р. Каплунов, И.И. Айнбиндер, В.С. Федотенко, В.А. Юков // Горный журнал. 2021. №9. С. 4-11. DOI: 10.17580/gzh.2021.09.01.
  31. Литвиновская Н.А., Кривогино Д.Н., Крамчанинов С.В. Разработка технологии размещения твердых бытовых отходов в действующих соляных шахтах // Горный журнал. 2023. №3. С. 67-71. DOI: 10.17580/gzh.2023.03.10.
  32. Галченко Ю.П. Интегральная экологическая оценка геомеханического состояния литосферы при устойчивом развитии минерально-сырьевого комплекса // Горный журнал. 2024. №1. С. 4-8. DOI: 10.17580/gzh.2024.01.01.
  33. Гончар Н.В., Соколовский А.В., Терешина М.А. Проект комплексного освоения георесурсов // Рациональное освоение недр. 2023. №3(71). С. 38-44. DOI: 10.26121/RON.2023.49.52.005
  34. Обоснование системы разработки с внутренним отвалообразованием при освоении крутопадающего месторождения Курасан / И.А. Пыталев, В.В. Якшина, А.А. Козловский, А.А. Полинов // Рациональное освоение недр. 2022. №4(66). С. 34-38. DOI: 10.26121/RON.2022.78.94.005.
  35. Пинаев В.Е., Якунин С.А. Обзор современных методик расчета ущерба, причиненного животному миру, в Российской Федерации // Отходы и ресурсы. 2017. №2. <https://resources.today/PDF/02RRO217.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/02RRO217.

## References

1. Ryumina E.V. *Ekonomicheskij analiz ushcherba ot ekologicheskikh narusheniy* [An economic analysis of damages from environmental disturbances]. Moscow: Nauka, 2009, 331 p. (In Russ.)
2. Reymers N.F. *Prirodopolzovanie: slovar-spravochnik* [Natural resource management: dictionary and handbook]. Moscow: Mysl, 1990, 637 p. (In Russ.)
3. State Planning Committee of the USSR, State Construction Committee of the USSR, Presidium of the Academy of Sciences of the USSR. Temporary typical methodology of calculating economic efficiency of taking environmental actions and evaluating economic damage caused to national economy as a result of environmental pollution. Moscow: Ekonomika, 1986, 95 p. (In Russ.)
4. Rayzberg B.A. *Sovremenniy ekonomicheskij slovar* [Contemporary dictionary of economics]. Moscow: INFRA-M, 2002, 480 p. (In Russ.)
5. Federal Law “On environmental protection” No. 7-FZ dated January 10, 2002. *Inform. spravochniy byul.* [Information and Reference Bulletin]. 2002;(155):60 p. (In Russ.)
6. Slavikovskaya Yu.O., Rudakova L.V., Rudakov R.B. Assessing consequences of man-caused environmental impact of mining enterprises. *Zhurnal ekonomicheskoy teorii* [Journal of Economic Theory]. 2016;(4):124-137. (In Russ.)
7. The Forestry Code of the Russian Federation No. 200-FZ dated December 04, 2006. *Rossiyskaya gazeta* [Russian Newspaper]. Federal Issue No. 4243 dated December 8, 2006. (In Russ.)
8. The Water Code of the Russian Federation No. 74-FZ dated June 3, 2006. *Rossiyskaya gazeta* [Russian Newspaper]. No. 121 dated June 8, 2006. (In Russ.)
9. Federal Law “On fishery and conservation of aquatic biological resources” No. 166-FZ dated December 20, 2004. *Parlamentskaya gazeta* [Parliament Newspaper]. No. 241 dated December 23, 2004. (In Russ.)
10. Federal Law “On wildlife” No. 52-FZ dated April 24, 1995. *Rossiyskaya gazeta* [Russian Newspaper] dated May 4, 1995. (In Russ.)
11. Methods for calculating the extent of damage caused to soils as a subject of environmental protection approved by Order of the Ministry of Natural Resources

- and Ecology No. 238 dated July 08, 2010. Available at: <http://www.garant.ru> (Accessed on April 12, 2022)
12. Order of the Ministry of Natural Resources of Russia “On amending the Methods for calculating the extent of damage caused to soils as a subject of environmental protection approved by Order of the Ministry of Natural Resources and Ecology No. 238 dated July 08, 2010” No. 316 dated July 11, 2018. Available at: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71916348/> (Accessed on April 12, 2022)
  13. Resolution of the Government of the Russian Federation “On approving features of compensation of damage caused to forests and natural objects in such forms resulting from breach of the legislation on forestry” No. 1730 dated December 29, 2018. Available at: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72041810/> (Accessed on April 12, 2022)
  14. Resolution of the Government of the Russian Federation “On rates of charges for the unit of forest resources and charges for the unit of the area of federally owned forest plots” No. 310 dated May 22, 2007 (as revised on January 06, 2020). Available at: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_law68813/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_law68813/) (Accessed on April 12, 2022)
  15. Order of the Ministry of Natural Resources of Russia “On approving the Methods for calculating the extent of damage caused to water bodies resulting from breach of the water legislation” No. 87 dated April 13, 2009 (as revised on August 26, 2015). Available at: <https://docs.cntd.ru/document/902159034> (Accessed on April 12, 2022)
  16. Order of the Ministry of Agriculture of Russia “On approving the Methods for calculating the extent of damage caused to aquatic biological resources” No. 167 dated March 31, 2020. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/564859759> (Accessed on April 12, 2022)
  17. Federal Law “On fishery and conservation of aquatic biological resources” No. 166-FZ dated December 20, 2004. Available at: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LA\\_W\\_50799/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LA_W_50799/) (Accessed on April 12, 2022)
  18. Resolution of the Government of the Russian Federation “On approving charges to calculate the extent of damage caused to aquatic biological resources” No. 1321 dated November 03, 2018. Available at: <https://base.garant.ru/72099272/> (Accessed on April 12, 2022)
  19. Order of the Ministry of Natural Resources of Russia “On approving the Methods for calculating the extent of damage caused to hunting resources” No. 948 dated December 08, 2011. Available at: <https://base.garant.ru/70132926/> (Accessed on April 12, 2022)
  20. Order of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation “On approving the Methods for calculating the extent of damage caused to wildlife resources registered in the Red Data Book of the Russian Federation and other wildlife resources not attributed to hunting and fishery resources and their environment” No. 107 dated April 28, 2008. Available at: <https://base.garant.ru/12161284/> (Accessed on April 12, 2022)
  21. Order of the Ministry of Natural Resources of Russia “On approving norms of allowable use of hunting resources and norms of abundance of hunting resources in hunting areas” No. 965 dated November 25, 2020. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/573053302> (Accessed on April 12, 2022)
  22. Resolution of the Government of the Russian Federation “On rates of charges for the unit of forest resources and charges for the unit of the area of federally owned forest plots” No. 310 dated May 22, 2007 (as revised on January 06, 2020). Available at: <https://base.garant.ru/12153804/> (Accessed on April 12, 2022)
  23. *Metodicheskie rekomendatsii po otsenke effektivnosti investitsionnykh projektov: ofits. izd.* [Methodological recommendations on assessing efficiency of capex projects: official edition]. 2<sup>nd</sup> edition. Moscow: Ekonomika, 2000, 421 p. (In Russ.)
  24. Kaplunov D.R., Radchenko D.N. Technological processes and charts of forming mined-out areas to implement a full cycle of comprehensive mining of ore deposits. *Problemy i perspektivy kompleksnogo osvoeniya i sokhraneniya zemnykh nedr: tezisy dokladov II Mezhdunarodnoy nauchnoy shkoly akademika K.N. Trubetskogo* [Problems and prospects of comprehensive mining and reservation of earth interior: Abstracts of reports presented at the 2<sup>nd</sup> Trubetskoy International Scientific School]. Moscow, 20-24 June 2016. Moscow: Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources, the Russian Academy of Sciences, 2016, pp. 274-276. (In Russ.)
  25. Kaplunov D.R., Radchenko D.N., Lavenkov V.S. Conditions of safe and environmentally balanced formation of mined-out areas of earth interior in comprehensive mining of solid mineral deposits. *Kombinirovannaya geotekhnologiya: ustoychivoe i ekologicheskii sbalansirovannoe osvoenie nedr* [Combined geotechnology: sustainable and environmentally balanced mining]. Magnitogorsk, 25-29 May 2015. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2015, pp. 20-21. (In Russ.)
  26. Trubetskoy K.N., Zakharov V.N., Kaplunov D.R., Rylnikova M.V. Efficient technologies for mineral waste use – The basis of the environmental safety of subsoil development. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal]. 2016;(5):34-40. (In Russ.) DOI: 10.17580/gzh.2016.05.03
  27. Kaplunov D.R., Radchenko D.N. Mined-out areas: Approaches to multipurpose use in complete integrated cycle of hard mineral mining. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal]. 2016;(5):28-33. (In Russ.) DOI: 10.17580/gzh.2016.05.02

28. Kaplunov D.R., Radchenko D.N. Design philosophy and choice of technologies for sustainable development of underground mines. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal]. 2017;(11):52-59. (In Russ.) DOI: 10.17580/gzh.2017.11.10
29. Kaplunov D.R., Yukov V.A. Principles of a mine transition to sustainable and environmentally sound development. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tehnichesky zhurnal)* [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. 2020;(3):74-86. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236-1493-2020-3-0-74-86. EDN QIZEUU
30. Kaplunov D. R., Aynbinder I. I., Fedotenko V. S., Yukov V. A. Underground ore mining technologies: Current challenges, sustainable development and transition to a new technological paradigm. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal]. 2021;(9):4-11. (In Russ.) DOI: 10.17580/gzh.2021.09.01
31. Litvinovskaya N.A., Krivogina D.N., Kramchaninov S.V. Technology for solid household waste disposal in operating salt mines. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal]. 2023;(3):67-71. (In Russ.) DOI: 10.17580/gzh.2023.03.10
32. Galchenko Yu.P. Environmental assessment of geomechanical behavior of lithosphere in sustainable development of mineral resources. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal]. 2024;(1):4-8. (In Russ.) DOI: 10.17580/gzh.2024.01.01
33. Gonchar N.V., Sokolovskiy A.V., Tereshina M.A. A project of comprehensive mining of georesources. *Ratsionalnoe osvoenie nedr* [Mineral Mining and Conservation]. 2023;(3(71)):38-44. (In Russ.) DOI: 10.26121/RON.2023.49.52.005
34. Pytalev I.A., Yakshina V.V., Kozlovskiy A.A., Polinov A.A. Justification of the mining method with inside dumping during the development of the steeply dipping Kurasan deposit. *Ratsionalnoe osvoenie nedr* [Mineral Mining and Conservation]. 2022;(4(66)):34-38. (In Russ.) DOI: 10.26121/RON.2022.78.94.005
35. Pinaev V.E., Yakunin S.A. Review of modern methodologies of calculating damage caused to wildlife in the Russian Federation. *Otkhody i resursy* [Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling]. 2017;(2). (In Russ.) Available at: <https://resources.today/PDF/02RRO217.pdf>. DOI: 10.15862/02RRO217

Поступила 26.07.2023; принята к публикации 07.06.2024; опубликована 30.09.2024  
Submitted 26/07/2023; revised 07/06/2024; published 30/09/2024

**Славиковская Юлия Олеговна** – кандидат экономических наук, старший научный сотрудник, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия.  
Email: slavikov1977@mail.ru. ORCID 0000-0003-2005-5650

**Yuliia O. Slavikovskaya** – PhD (Econ.), Senior Researcher, Institute of Mining, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia.  
Email: slavikov1977@mail.ru. ORCID 0000-0003-2005-5650

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

УДК 622.272.6

DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-3-22-32



## ВОЗМОЖНОСТЬ ПОВТОРНОЙ ВЫЕМКИ РУД ИЗ МЕЖДУКАМЕРНЫХ ЦЕЛИКОВ С ПОЛЕВОЙ ПОДГОТОВКОЙ В УСЛОВИЯХ ОБРУШЕННОЙ ЗОНЫ С МУЛЬДОЙ СДВИЖЕНИЯ ЗАЛЕЖЕЙ

Бекбергенов Д.К.<sup>1</sup>, Джангулова Г.К.<sup>2</sup>, Жанакоева Р.К.<sup>3</sup>, Абиев Б.А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт горного дела имени Д.А. Кунаева, Алматы, Республика Казахстан

<sup>2</sup> Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Республика Казахстан

<sup>3</sup> Казахский автомобильно-дорожный институт имени Л.Б. Гончарова, Алматы, Республика Казахстан

**Аннотация.** В статье рассматриваются вопросы отработки запасов на флангах Жезказганского месторождения и Анненского рудного поля, где концентрируется основная добыча руды, до глубины 500 м на залежах с углом наклона от 15 до 35° и более градусов, обоснование технологии повторной выемки руды из междукammerных целиков (МКЦ) с полевой подготовкой в сложных горнотехнических условиях зон обрушения с мульдой сдвижения на основе рейтингового показателя. Решение поставленных задач осуществлялось путем проведения теоретических, экспериментальных исследований стадийности и порядка отработки запасов с выполнением для повторной отработки оставшихся запасов из целиков с использованием методов по обоснованию геомеханических параметров и определение ценности полезных ископаемых. На основании исследований обоснованы технологические схемы возможности повторной отработки оставшихся запасов руд из МКЦ с полевой подготовкой и определением порядка последовательности вовлечения на конкретных рассмотренных блоках, в нисходящем порядке с очередностью: в первую очередь, в отработку вовлекается блок 54, далее блок и 22-23-24, блоки 15 и 15-15 юг, в местах, где перекрывающиеся залежи, и затем блок 7бис шахты «Анненская» Восточно-Жезказганского рудника в сложных горнотехнических условиях обрушенных зон с мульдой сдвижения, а также на основе выполненных технико-экономических расчетов выемка в отработку запасов руд из целиков в этих блоках является эффективной и безопасной при повторной выемке руд на реальных примерах месторождений в сложных горно-геологических и горнотехнических условиях при истощении запасов минеральных ресурсов. Данная возможность повторной выемки руд из МКЦ с полевой подготовкой в условиях обрушенной зоны с мульдой сдвижения залежей может использоваться в разных условиях горно-геологических, горнотехнических условий месторождений.

**Ключевые слова:** разработка месторождений, подземная технология, технологические блоки, горизонт отработки, доставочный штрек, геомеханическое состояние массива, горизонт отработки, шахта «Анненская»

© Бекбергенов Д.К., Джангулова Г.К., Жанакоева Р.К., Абиев Б.А., 2024

### Для цитирования

Возможность повторной выемки руд из междукammerных целиков с полевой подготовкой в условиях обрушенной зоны с мульдой сдвижения залежей / Бекбергенов Д.К., Джангулова Г.К., Жанакоева Р.К., Абиев Б.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №3. С. 22-32. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-22-32>



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

## THE POSSIBILITY OF REPEATED ORE EXTRACTION FROM ROOMS AND PILLARS WITH FIELD PREPARATION IN A COLLAPSED ZONE WITH A SHIFT TROUGH OF DEPOSITS

Bekbergenov D.K.<sup>1</sup>, Dzhangulova G.K.<sup>2</sup>, Zhanakova R.K.<sup>3</sup>, Abiev B.A.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Kunaev Institute of Mining, Almaty, the Republic of Kazakhstan

<sup>2</sup> Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, the Republic of Kazakhstan

<sup>3</sup> Goncharov Kazakh Automobile and Road Institute, Almaty, the Republic of Kazakhstan

**Abstract.** The article discusses the issues of mining the reserves on the flanks of the Zhezkazgan deposit and the Annenskaya ore field, where the main ore production is concentrated, to a depth of 500 m in deposits with an angle of inclination from 15° to 35° and over, the study is aimed at providing a rationale for the technology of repeated ore extraction from rooms and pillars with field preparation in complicated mining and technical conditions of collapsed zones with a shift trough based on a ranking indicator. The set objectives were achieved by conducting theoretical and experimental studies on stages and a procedure for mining the reserves and repeated mining of the residual reserves from pillars, using methods for providing a rationale for geomechanical parameters and determining the value of minerals. The studies resulted in providing rational process flow charts of potential repeated mining of residual ore reserves from rooms and pillars with field preparation, and determining the order of inclusion at specific blocks under consideration, in a descending order: firstly, block 54, then blocks 22-23-24, blocks 15 and 15-15 south, in areas, where deposits are overlapped, and then block 7bis of the Annenskaya mine of the East Zhezkazgan Mine in complicated geotechnical conditions of collapsed zones with a shift trough. Based on technical and economic calculations, the extraction of ore reserves from pillars in these blocks is efficient and safe in case of repeated extraction of ores using the existing examples of the deposit in complicated mining, geological and technical conditions, when mineral resources are depleted. Such option of repeated ore extraction from rooms and pillars with field preparation in the collapsed zone with the shift trough may be used in various mining, geological and technical conditions of deposits.

**Keywords:** field development, underground technology, technological blocks, mining horizon, delivery gallery, geomechanical state of the massifs, Annenskaya mine

### For citation

Bekbergenov D.K., Jangulova G.K., Zhanakova R.K., Abiyev B. The Possibility of Repeated ore Extraction from Rooms and Pillars with Field Preparation in a Collapsed Zone with a Shift Trough of Deposits. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 3, pp. 22-32. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-22-32>

### Введение

Перспективным приоритетом устойчивого развития подземной добычи руды в сложных горно-технических условиях при истощении запасов минеральных ресурсов становится очевидным использование геотехнологии с повторной добычей из оставленных запасов руд, сосредоточенных в междукамерных (МКЦ), ленточных (ЛЦ), барьерных (БЦ) и панельных (ПЦ) целиках, являющихся конструктивными элементами камерно-столбовой системы разработки. Данная проблема добычи руды из оставленных целиков рассмотрена многими авторами на рудных и угольных месторождениях [1-3]. Однако необходимо шире рассматривать возможность применения технологии данной системы с учетом мирового опыта и современных достижений науки и техники с целью оптимизации добычи и обеспечения безопасной отработки месторождений полезных ископаемых.

Исходя из горно-геологических, горно-технических условий, разные варианты технологии камерно-

столбовой системы разработки применяют при отработке горизонтальных и весьма пологих залежей (0-12°) с мощностью рудного тела 3-8 м средней и ниже средней ценности руды.

Анализ применения данной технологии в мировой практике показывает, что помимо классического варианта существует камерно-столбовая система с механизированной выемкой угловыми формами целиков, которые широко применяются при отработке залежей руд Карлсбадского бассейна в США, а также в Саскачеванском бассейне [3]. В данном случае размеры добычных панелей изменяются в пределах от 500 до 900 м. Разновидность данной системы с применением различных форм целиков (прямоугольных, квадратных, ромбовидных) зависит от последовательности технологических операций и используемых средств доставки руды.

Камерно-столбовые системы используются при разработке калийных руд Старобинского месторождения [4]. Известен опыт столбовых систем в бассейне Наварра (Испания) и бассейне Мюльхаус

(Франция), однако эти месторождения в настоящее время не функционируют [5].

Камерно-столбовая система разработки по шаблону «шеvron» или «кримстмас три» осуществляется при добыче на Северно-Йоркширской залеже в Англии. Существуют различные разновидности данной системы, в зарубежной литературе иногда ее также называют технологией «контроль времени», так как она используется в слабоустойчивых породах с быстрым продвижением фронта очистных работ (ФОР) и максимально возможным извлечением [6]. Длина таких панелей достигает от 1000 до 1400 м при ширине от 80 до 150 м. Для разработки пластов мощностью от 1,2 до 5 м применяются камерно-столбовую систему с угловой формой целиков. В этом случае отработка запасов в зависимости от горно-геологических условий может осуществляться тремя способами: прямой, обратный порядок отработки и прямой порядок с последующим обратным доизвлечением запасов из целиков. Размер очистных ходов и целиков определяются исходя из технологических расчетов в увязке с техническими характеристиками добычного оборудования. Коэффициент извлечения полезного ископаемого варьируется от 30 до 90%.

Мировой опыт использования подобного типа технологической схемы указывает на возможность достижения годовой производительности одного забоя в пределах 0,6-1,5 млн т в год.

Однако современное развитие подземной разработки природно-техногенных рудных запасов из недр, отработанных камерно-столбовой системой, характеризуется неблагоприятными горно-геологическими условиями разработки, а именно снижением содержания полезных компонентов в руде, увеличением доли труднообогатимых руд наряду с недостаточностью горно-геологической информации и высокой волатильностью цен на металлы, что в совокупности приводит к нарушению устойчивости функционирования горнотехнической системы, безопасности ведения эксплуатационных работ и комплексному освоению природно-техногенных запасов из недр в обрушенных условиях залежей рудных месторождений. Поэтому обоснование технологических схем и параметров горнотехнической системы, обеспечивающих ее устойчивое функционирование при подземной отработке медных месторождений в условиях нестабильных рыночных отношений, а также в сложных горно-геологических и геомеханических условиях разработки, является важной научной проблемой.

### **Состояние вопроса и постановка проблемы**

В настоящее время при подземной разработке подземных рудников Жезказганского месторождения сталкиваются с целым рядом проблем, среди которых следует выделить возрастание горного давления, низкое качество руд, усугубляемое наличием в структуре рудных тел мелких и крупных породных включений.

Проведенный анализ мирового опыта ведения подземной разработки природно-техногенных рудных запасов из недр, отработанных камерно-столбовой системой, свидетельствуют о том, что в отечественной и мировой практике имеются многочисленные примеры и результаты применения данной системы с регулярным и нерегулярным расположением МКЦ [7-10]. Эта же проблема существует при добыче руды на Жезказганском месторождении, где доля повторной добычи из оставленных запасов руд составляет порядка 85%.

Массив пород Анненского района представлен чередующимися слоями песчаников, алевролитов и аргиллитов с преобладанием в общей массе красноватых. Промышленная концентрация меди находится исключительно в серых мелко- и среднезернистых песчаниках. Слои красных песчаников и алевролитов оруденения не имеют. Около 80% запасов района сосредоточено на залежах с углами падения 15-35°, свыше 35° – 8%. Характерной особенностью Анненского поля является многоярусность оруденения. Залежи расположены на 9 рудоносных горизонтах, включающих в себя 23 перекрывающиеся рудные пачки [11-14].

Рудные горизонты и входящие в них рудные тела разделены между собой прослоями пустых пород мощностью от 4 до 40 м. Рудные тела имеют форму пластообразных залежей, размеры которых по площади варьируют в широких пределах – от 0,1-0,5 до 1,0-2,0 км<sup>2</sup> и более. Кроме пластообразных залежей встречаются рудные тела ленточной и линзообразной формы протяженностью 800-2500 м при ширине 100-400 м. Характер выклинивания рудных тел редко бывает отчетливым, чаще всего переходы от богатых руд к бедным и бедных к безрудным песчаникам весьма расплывчаты. Мощность рудных тел колеблется от 1,5 до 20 м и более. Углы падения рудных тел соответствуют углам падения вмещающих пород и составляют в западной и северозападной части поля 0-15°, в центральной и восточной – 15-35°, иногда более [15-18].

Наиболее устойчивыми являются рудные и безрудные серые песчаники. К неустойчивым относятся алевролиты, аргиллиты и внутрiformационные конгломераты. Аргиллитами и алевролитами перекрываются около 40% запасов руды Анненского рудника. Наблюдается снижение устойчивости на участках, где проявилась складчатость, смятие, а также в зонах трещиноватости пород и руд.

Однако сложившаяся при отработке запасов камерно-столбовая система на Жезказганском месторождении, вызвавшая ухудшение горнотехнического и геомеханического состояний в условиях повторной подземной отработки запасов шахты Анненского района, обрушение залежей с периодическим характером техногенно-геомеханических процессов деформирования и разрушения оставленных целиков в очистных панелях блока месторождения с учетом



выхода зоны обрушения на дневную поверхность и мульды сдвижения залежей, стала причиной произошедших событий в ПО «Жезказганцветмет» ТОО «Корпорация Казахмыс» [17-19]:

– с 1977 по 1990 годы произошло 6 массовых обрушений;

– с 1991-2005 годы число обрушений увеличилось на 11, где оставленные запасы в 7151 целиках – 14,5% имели срок службы более 30% и 1457 (20,4%) целиках отнесены к ослабленным, а 123 (17,2%) отнесены к разрушенным;

– по результатам разрушений МКЦ в периоды 2004-2006 годов, где и были провалы междупластий в отработанных перекрывающихся наклонных залежах в Анненском горном районе, произошло крупное обрушение с объединенной мульдой сдвижения, охваченной площадью около 2 км по простиранию залежи и по падению;

– в 2015 году на шахте «Анненская» Восточно-Жезказганского рудника произошло обрушение в виде отслоения кровли блока 29 юг залежи Анн-9-I-V горизонта 160 м, площадь отслоения пород из кровли составляла 9404 м<sup>2</sup> с объемом погашенных пустот 103,1 м<sup>3</sup>. По данным 2015 года, за весь период разработки Жезказганского месторождения оформлено около 50 тыс. МКЦ, являющихся основными причинами ухудшения геомеханической обстановки на месторождении, и доля устойчивых целиков снизилась с 75 до 61% за счет увеличения доли полностью разрушенных целиков в 2 раза, то есть с 13 до 26%, а также в течение 6 лет на Жезказганском месторождении общий объем образованных пустот составлял 389812 тыс. м<sup>3</sup>;

– 9 октября 2020 года на рудном поле Восточно-Жезказганского рудника произошло очередное локальное обрушение по штреку 26 залежи Кр. 9-II-III, где граница обрушения проявилась с выходом на дневную поверхность без сейсмического проявления горного давления на данном участке шахты, при этом площадь обрушения составляла 140×100 м<sup>2</sup>.

Исходя из вышеизложенного, при отработке запасов залежей в наклонных залежах Анненского рудного поля Жезказганского месторождения возникают сложные горнотехнические участки у очагов массовых обрушений с мульдой сдвижения массива пород [20-24].

### Материалы и методы исследования

На флангах обрабатываемой части Жезказганского месторождения концентрируются запасы Анненского рудного поля, где сейчас концентрируется основная добыча руды, размещающейся на глубине 500 м на залежах с углом наклона от 15 до 35° и более. При этом более 80% запасов сосредоточено также в перекрывающихся залежах. Число перекрытий в отдельных случаях достигает 5-7 и более [20].

По сравнению с центральным рудным полем, породы этого района имеют более круглые углы падения – до 30-35° и более. Углы падения у флексур достигают 70°. Залежи с углами падения 0-15° составляют около 12% запасов руды и расположены в западной и северо-западной частях района. В центральной части района в залежах с углами падения 15-35° содержится около 80% и в восточной части (угол падения более 35°) – 8% запасов.

Руда и вмещающие породы довольно устойчивы, но характеризуются несколько пониженными прочностными характеристиками [21, 24], повышенной трещиноватостью и водообильностью по сравнению с центральным рудным полем.

По глубине залегания запасы Анненского района распределяются следующим образом: от поверхности до горизонта 300 м – 2%, от 360 до 270 м – 5,2%, от 270 до 180 м – 5,8%, от 180 до 90 м – 18,5%, от 90 до 0 м – 34%, от 0 до -90 м – 26% и ниже – 8,5%.

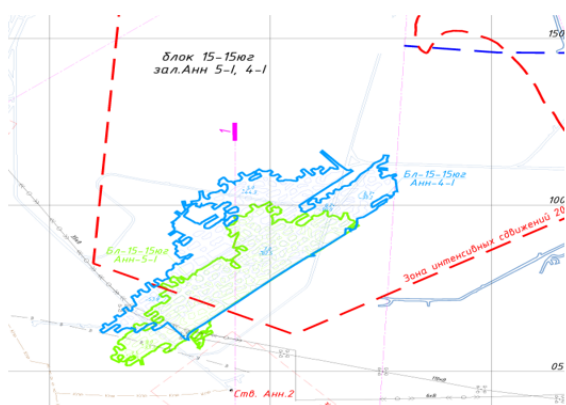
Запасы в МКЦ по рекомендуемым блокам шахты «Анненская» ВЖР на состояние 01.01.2023 отражены в таблице.

Таблица 1. Запасы МКЦ по рекомендуемым блокам шахты «Анненская» на состояние 01.01.2023  
Table 1. Reserves of the room-and-pillar system by recommended blocks of the Annenskaya mine as of 01.01.2023

Блоки, панель	Залежи	Всего запасов на 01.01.2023								
		Угол падения, град	Мощность, м	Руда	%	Cu	Pb	Zn	Удельное по залежи	Ag
Бл-15-15юг	Анн 5-1	10-12	8-10	150,3	1,51	2263	0	0	33,64	5056
П-54	Анн 3-II, 2-IV	0-5	8-10	190,0	0,79	1501	0	0	0	0
Бл. 15	Анн 3-II	0-5	7-10	99,2	1,49	1478	0	0	35,01	3473
П-89бис	Анн 7-1, 8-1	10-12	7-10	276,1	1,41	3903	88	226	18,91	5222
П-89бис	Анн 7-1, 8-1	10-12	7-10	23,9	1,21	290	0	0	16,23	388
Бл-7бис	Анн 2-II	0-5	4-6	94,4	0,70	661	0	0	3,06	289
Бл-24	Анн 3-II, 3-I	10-12	6-12	250,0	0,78	1950	107	151	9,24	2310
Бл-24	Анн 3-II, 3-I	10-12	6-12	18,9	0,87	164	0	0	10,26	194
Бл-22, 23	Анн 3-I, 3-II	10-12	6-12	509,8	1,23	6271	0	1012	14,33	7305
Бл-22, 23	Анн 3-I, 3-II	10-12	6-12	235,8	1,18	2782	0	0	14,02	3306
Итого:				1548	1,10	17077	195	1389	154,9	23985

В связи с этим возникает проблемный вопрос повторной отработки оставшихся запасов и выемки МКЦ по блокам Бл. 15-15юг залежи Анн-5-I-4-I; Бл. 22-23-24 залежи Анн-3-II, 3-I в. и 2-IV; Бл. 54 залежи Анн-3-II, 2-IV; Бл. 89бис залежи Анн-7-I, Бл. 7бис залежи Анн-2-II, Бл. 15 залежи Анн-3-II, 3-I в.н., находящиеся в обрушенной зоне мульды сдвижения залежей шахты «Анненская» Восточно-Жезказганского рудника, где нами предлагаются технологические схемы по каждому блоку.

Схема 1. Технологический блок Бл. 15-15юг залежи Анн-5-I находится между горизонтами -35 м и -55 м, а залежь этих блоков Анн-4-I находится между горизонтами -46 м и -96 м (рис. 1).



Из проведенных исследований к этому блоку имеется первый доступ по доставочному штреку блока Бл. 10бис Анн-5-I от штрека 6 горизонта -100 м и -105 м, а второй доступ – по штреку блока 7бис горизонта -90 м.

Минимальный породный прослой между залежами 5-1 и 4-1 составляет 20 м, что позволит в дальнейшем без потерь отработать и нижележащую залежь 4-1.

Схема 2. Технологический блок Бл.15 залежи Анн- 3-II, Анн-3-I находится между горизонтами -62 м и -135 м (рис. 2), ниже от него находится залежь Анн-4-I, доступ к этим залежам имеется.

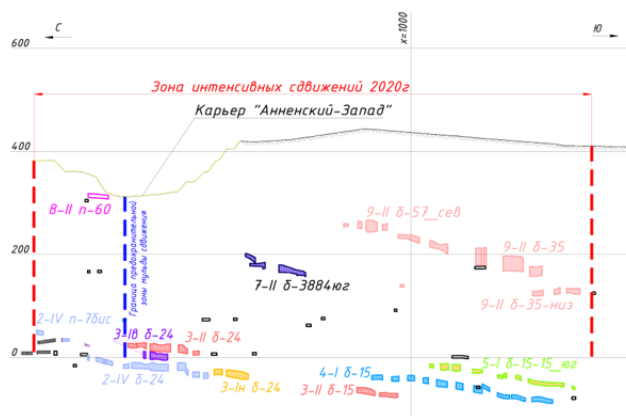


Рис. 1. Технологическая схема блока Бл. 15-15юг залежи Анн-5-I для повторной полевой отработки оставшихся запасов из МКЦ на шахте «Анненская»

Fig. 1. Process flow chart of block 15-15 south of the Ann-5-I deposit for repeated field mining of the remaining reserves from the room-and-pillar system at the Annenskaya mine

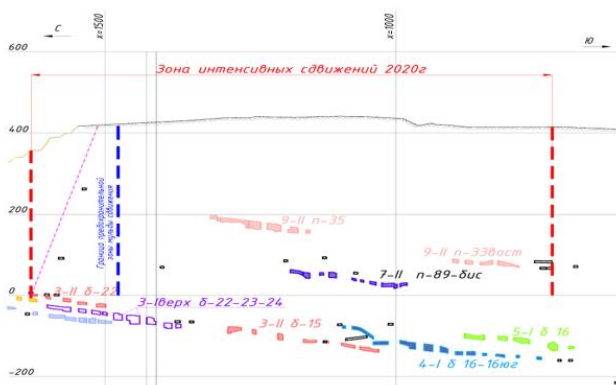
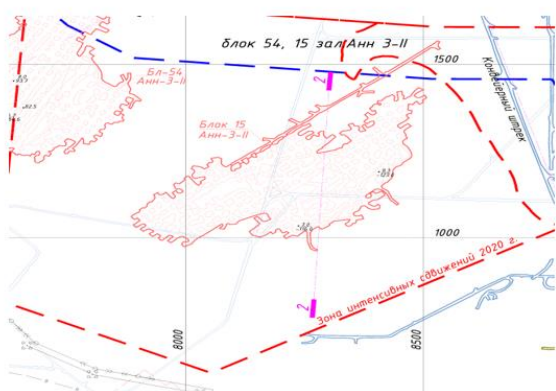


Рис. 2. Технологическая схема блока Бл. 15 залежи Анн-3-II, Анн-3-I в плане для повторной полевой отработки оставшихся запасов из МКЦ на шахте «Анненская»

Fig. 2. Process flow chart of block 15 of the Ann-3-II, Ann-3-I deposits in the plan view for repeated field mining of the remaining reserves from the room-and-pillar system at the Annenskaya mine

Для отработки запасов по данному блоку сначала выполняем сравнения по высотным отметкам этих блоков горизонта -62 м и -135 м и далее с учетом высотных отметок определяем имеющийся к ним доступ для проходки выработок на горизонте -105 м и -90 м.

Схема 3. Технологическая схема блоков Бл. 22-23-24 залежи Анн-3-II, 3-I расположена между горизонтами +12 м и -18 м, и внизу находится залежь Анн-2-IV (рис. 3).

Для повторной отработки запасов из МКЦ по данному блоку имеются нижеследующие технологические схемы:

- первый доступ к блоку по транспортному штреку Бл. 29 восток горизонта -47 м;
- второй доступ по штреку 1 горизонта -90 м;
- имеется доступ на залежь Анн-2-IV по заезду 2 горизонта -60 м.

Поскольку к высотным отметкам залежей Анн-3-II, 3-I горизонта +12 м и горизонту -18 м подходит транспортный штрек блока Бл. 29 восток горизонт -47 м, и от него можно будет пройти транспортный уклон вверх к горизонту +12 м. После того как транспортный уклон дойдет до нужной отметки сверху вниз по падению залежи, необходимо будет пройти полевой доставочный штрек и параллельно обрабатывать залежь Анн-3-II, 3-I в нисходящем порядке согласно локальному проекту на их отработку.

А залежь Анн-2-IV будет обрабатываться после отработки запасов залежей из верхних горизонтов. Для этого к ним необходимо проходить от заезда 2 горизонта -60 м транспортный штрек, и отработка его запасов будет осуществляться сверху вниз по аналогичной схеме.

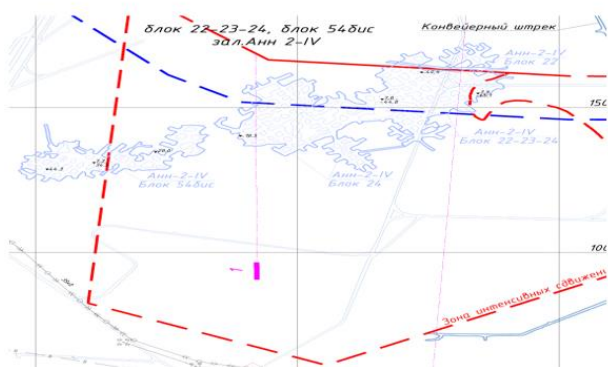


Рис. 3. Технологическая схема блоков Бл. 22-23-24 залежи 2-IV для повторной полевой отработки оставшихся запасов из МКЦ на шахте «Анненская»

Fig. 3. Process flow chart of block 22-23-24 of deposit 2-IV for repeated field mining of the remaining reserves from the room-and-pillar system at the Annenskaya mine

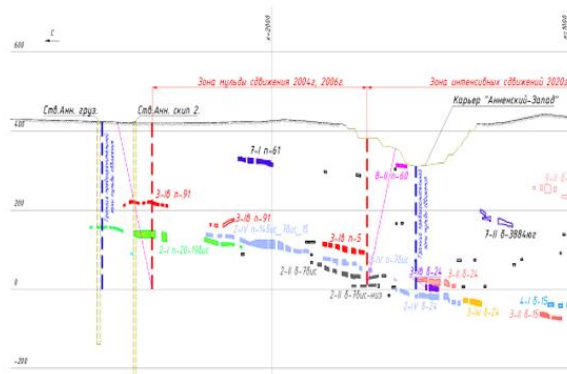
Схема 4. Эксплуатационный блок Бл. 54 залежи Анн-3-II, 2-IV находится на уровне горизонта +75 м (рис. 4).

Схема 5. Блок 7бис залежи Анн-2-II находится на горизонте 0 м шахты «Анненская» Восточно-Жезказганского рудника (рис. 5) и доступ к нему имеется, где по доставочному штреку блока 7бис проводится полевой штрек, с севера на юг и от него будут производиться подготовительные горные выработки. Для этого отработку запасов данного блока необходимо произвести сверху вниз согласно локальному проекту на их отработку.

Схема 6. Технологический блок Бл. 89бис залежи Анн-7-I находится между горизонтами +57 м и +20 м (рис. 6) и имеются доступ по штреку 2 горизонта -90 м и доступ по штреку 6 горизонта -90 м.

Ниже этого блока имеется обрушенная залежь Анн-3-II горизонта -62 м и горизонта -135 м. Исходя из этого, на данный блок доступ закрыт и не подлежит повторной отработке рудных запасов. В связи с чем необходимо восстановление ранее пройденных горно-капитальных и горно-подготовительных выработок для изучения данного района. Для этого при отработке запасов из МКЦ из зоны обрушения с мульдой сдвижения на опасных участках все горно-проходческие работы должны выполняться в строгом соблюдении требований геомеханической, сейсмической, промышленной безопасности и других нормативных требований по безопасному ведению работ.

Таким образом, из вышеизложенного следует, что все анализируемые блоки имеют доступ для повторной полевой отработки оставшихся запасов на шахте «Анненская» Восточно-Жезказганского рудника, кроме технологического блока Бл. 89бис залежи Анн-7-I.



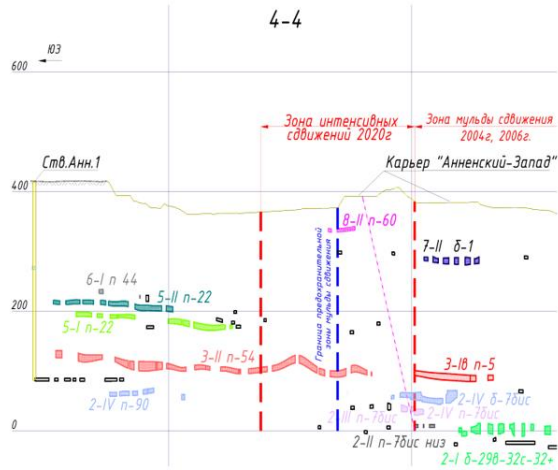
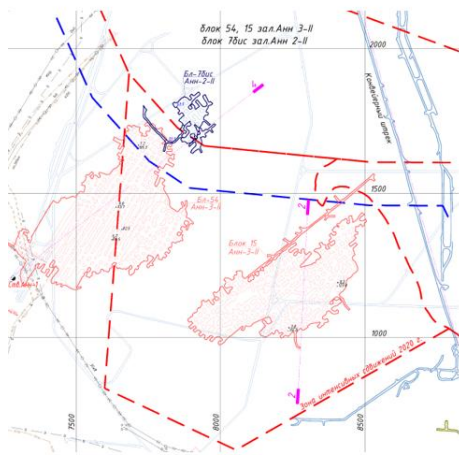


Рис. 4. Технологическая схема блока Бл. 54 залежи Анн-3-II и 2-IV для повторной полевой отработки оставшихся запасов из МКЦ на шахте «Анненская»

Fig. 4. Process flow chart of block 54 of the Ann-3-II and 2-IV deposits for repeated field mining of the remaining reserves from the room-and-pillar system at the Annenskaya mine

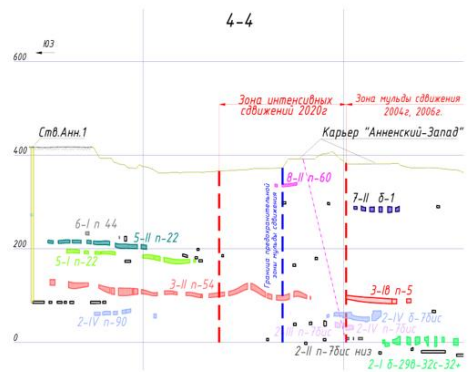
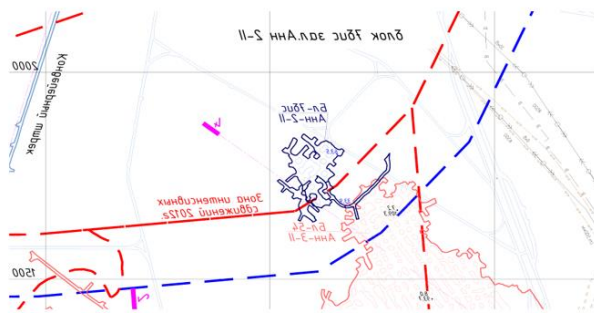


Рис. 5. Технологическая схема блока Бл. 7бис залежи Анн-2-II для повторной полевой отработки оставшихся запасов из МКЦ на шахте «Анненская»

Fig. 5. Process flow chart of block 7bis of the Ann-2-II deposit for repeated field mining of the remaining reserves from the room-and-pillar system at the Annenskaya mine

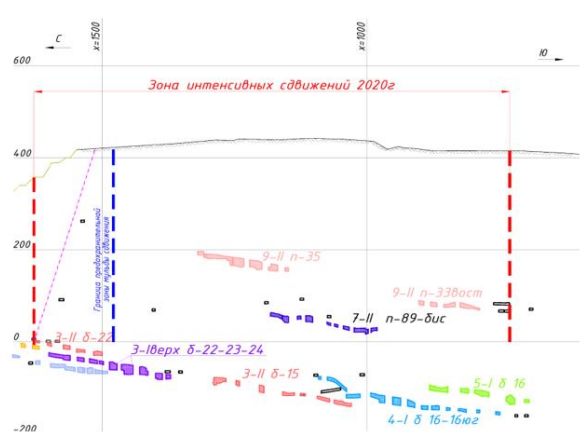
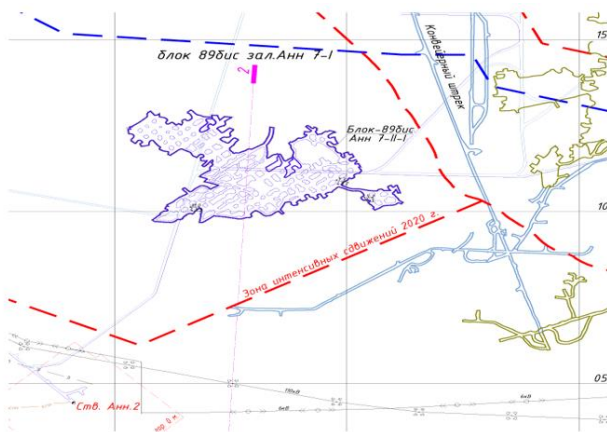


Рис. 6. Технологическая схема блока Бл. 89бис залежи Анн-7-I для повторной полевой отработки оставшихся запасов из МКЦ на шахте «Анненская»

Fig. 6. Process flow chart of block 89bis of the Ann-7-I deposit for repeated field mining of the remaining reserves from room-and-pillar system at the Annenskaya mine

## Результаты и их обсуждения

По результатам технико-экономических расчетов по вышеуказанным пяти блокам шахты «Анненская» Восточно-Жезказганского рудника расчет производственной себестоимости на 1 т катодной меди соответственно по блокам составляет: Бл. 15-15юг залежи Анн 5-I – \$4621 за тонну, Блок 15 залежи Анн 3-II – \$4653 за тонну, Блок 22-23-24 залежи Анн 3-II и 3-I – \$6002 за тонну, Бл. 54 залежи Анн 3-II и 2-IV – \$8104 за тонну, Бл. 7бис – \$9052 за тонну.

Отработку оставшихся запасов и выемки МКЦ на шахте «Анненская» в блоках Бл. 15-15юг залежи Анн-5-I-4-I; Бл. 22-23-24 залежи Анн-3-II, 3-I в. и 2-IV; Бл. 54 залежи Анн-3-II, 2-IV; Бл. 7бис залежи Анн-2-II, Бл. 15 залежи Анн-3-II, 3-I в.н., находящихся в обрушенной зоне с сейсмической активностью в условиях мульды сдвижения, необходимо осуществлять в нисходящем порядке. В первую очередь в отработку вовлекается блок 54, затем блоки 22-23-24, далее блоки 15 и 15-15юг, в местах, где нет перекрывающих залежей, и затем блок 7бис.

Для прогнозирования расширения границы мульды сдвижения по площади и глубине в районе обрушения шахты «Анненская» Восточно-Жезказганского рудника, а также с целью изучения негативного влияния развития мульды сдвижения в зоне обрушения на горные выработки и очистное пространство рекомендуется проведение систематического деформационного мониторинга, состоящего из инструментальных наблюдений и научно-исследовательских работ в области геомеханики, изучение напряженно-деформированного состояния массива.

Негативного влияния деформационных процессов мульды сдвижения на горно-капитальные выработки, такие как стволы шахты «Анненская» Восточно-Жезказганского рудника, конвейерный штрек, который находится на отметке -180 м, не выявлено.

## Заключение

На основании исследования стадийности и порядка отработки запасов (погашения запасов) с выполнением оценки на возможность отработки оставшихся запасов и выемки МКЦ, Бл. 15-15юг залежи Анн – 5-I-4-I; Бл. 22-23-24 залежи Анн-3-II, 3-I в.н., 2-IV; Бл. 54 залежи Анн-3-II, 2-IV; Бл. 89бис залежи Анн-7-I, Бл. 7бис залежи Анн-2-II, Бл. 15 залежи Анн-3-II, 3-I в.н., находящихся в зоне сейсмической активности, получены следующие результаты:

1. Проведенная оценка показывает возможность проведения повторной отработки оставшихся запасов руд из МКЦ с полевой подготовкой на шахте «Анненская» в блоках: Бл. 15-15юг залежи Анн-5-I-4-I; Бл. 22-23-24 залежи Анн-3-II, 3-I в. и 2-IV; Бл. 54 залежи Анн-3-II, 2-IV; Бл. 89бис залежи Анн -7-I, Бл. 7бис залежи Анн-2-II, Бл. 15 залежи Анн-3-II, 3-I в.н., находящихся в обрушенной зоне с сейсмической ак-

тивностью в условиях мульды сдвижения залежей шахты «Анненская» Восточно-Жезказганского рудника.

2. Негативного влияния деформационных процессов мульды сдвижения на горно-капитальные выработки, такие как стволы шахты «Анненская», конвейерный штрек, который находится на отметке -180 м, не выявлены.

3. Исходя из условий обеспечения безопасного ведения горных работ, определены порядок и последовательность вовлечения запасов при отработке оставшихся запасов руд из МКЦ на шахте «Анненская» в рассмотренных блоках: Бл. 15-15юг залежи Анн-5-I-4-I; Бл. 22-23-24 залежи Анн-3-II, 3-I в. и, 2-IV; Бл. 54 залежи Анн-3-II, 2-IV; Бл. 7 бис залежи Анн-2-II, Бл. 15 залежи Анн-3-II, 3-I в.н., находящихся в обрушенной зоне с сейсмической активностью в условиях мульды сдвижения, и необходимо осуществлять в нисходящем порядке. В первую очередь отработка блока 54, затем блоков 22-23-24, далее блоков 15 и 15-15юг в местах, где нет перекрывающих залежей, и затем блок 7бис.

4. По результатам технико-экономического расчета вовлечения в отработку запасов блоки Бл. 15-15юг залежи Анн-5-I-4-I, 15 залежи Анн-3-II, 3-I, Бл. 22-23-24 залежи Анн-3-II, 3-I характеризуются положительной экономической эффективностью при цене катодной меди \$8141 за тонну, а для блоков Бл. 54 залежи Анн-3-II, 2-IV и 7бис залежи Анн-2-II эффективность обеспечивается при цене катодной меди \$11800 за тонну.

## Список источников

1. Освоение камерно-столбовой системы разработки ниже границы горных ударов в условиях шахты «Денисовская» / Ордин А.А. и др. // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. 2014. Т. 1. №1. С. 273-279.
2. Жикаляк Н.В. Новый показатель газоносности песчаников // *Геотехническая механика*. Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины, 2003. Вып. 42. С. 238-246.
3. The combined method for assessing risk factors in underground construction / Imansakipova B.B., Sdvyzhkova O.O., Isabayev K.Z., Shakieva G. // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020, no. 3, pp. 53-58. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-3/053>
4. Dutton S.P. Play analysis and leading edge oil-reservoir development methods in the Permian Basin; increased recovery through advanced technologies // *AAPG Bulletin*. 2005, vol. 89, no. 5, pp. 553-576. DOI: 10.1306/12070404093
5. Prediction of mining induced subsidence by sparrow search algorithm with extreme gradient boosting and TOPSIS method / Xu C., Zhou KP, Xiong X., Gao F., Lu Y. // *Acta Geotechnica*. 2023, vol. 18, no. 9, pp. 1-17.
6. Evans V., Mike Mayev. Development of the Saskatchewan Potash Mines // *CIM Convention-Montreal*. Canada, 2011.

7. Predicting tunnel squeezing using support vector machine optimized by whale optimization algorithm / Zhou J., Zhu S.L., Qiu Y.G., Armaghani D.J., Zhou A.N., Yong W.X. // *Acta Geotechnica*. 2022, vol. 17, no. 4, pp. 1343-1366.
8. Tishkov M., Potvin Y., Jakubec J. (eds) Evaluation of caving as a mining method for the Udachnaya underground diamond mine project // *Proceedings of the Fourth International Symposium on Block and Sublevel Caving*, Australian Centre for Geomechanics, Perth, 2018, pp. 835-846.
9. Couto P.M., Green S. Improving the Mining Efficiencies Utilising a Combination of Elongates and Packs at Unisel Mine. Welkom: AMMSA On-line Publication; 2018, pp. 1-12.
10. Numerical back analysis of structurally controlled cave initiation at propagation at the Henderson Mine / Sainsbury D.P., Sainsbury B.L., Board M.P., Loring D.M. // *Presentation at the 45th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium held in San Francisco, CA, June 26-29, 2011*.
11. Guéguen Y., Kachanov M. Effective elastic properties of cracked rocks-Anoverview. In: Leroy YM, Lehner FK, editors. *Mechanics of crustal rocks*. CISMcourses and lectures. Vienna: Springer, 2011, pp. 73-126.
12. Woo K., Eberhardt E., A. van As. Characterization and empirical analysis of block caving induced surface subsidence and macro deformations // *ROCKENG09: Proceedings of the 3rd CANUS Rock Mechanics Symposium, Toronto, May 2009* (Ed: M. Diederichs and G. Grasselli).
13. Бекбергенов Д.К. Особенности технологии повторной добычи руд в условиях обрушенного района подземным способом на примере Жезказганского месторождения // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2017. №3 (специальный выпуск 3). 14 с.
14. Анализ возможности отработки запасов шахты «Анненская» и 57, находящихся в мульде сдвижения. №04-3.1.4-9-52 от 16.10.19 г. Геомеханический отдел Маркшейдерско+геомеханической службы Рудуправления ГМК ТОО «Корпорация Казахмыс». 8 с.
15. Информация обследования горных выработок, попадающих в мульду сдвижения и 150-метровую зону мульды сдвижения 2004-2006 гг. по шх. «Анненская» ВЖР от 1-31.10.2014 г. 12 с.
16. К вопросу перспективы развития горных работ Анненского района. Общее состояние района мульды сдвижения 2004, 2006 гг. и 150-метровой зоны вокруг нее; №08-23-21-618 от 12 августа 2011 г. Геомеханическое управление ТОО «Корпорация Казахмыс». 11 с.
17. Экспертная оценка возможности отработки запасов в пределах зоны сдвижений, образовавшейся в результате обрушений 2004-2006 гг. в полях Восточного и Анненского рудников / Зав. лабораторией геодинамики и горного давления ИГД УрО РАН, д.т.н., профессор О.В. Зотеев; от 04.12.2009 г. 7 с.
18. Оценка по вовлечению в повторную отработку блоков верхних горизонтов на прилегающих с востока к мульде сдвижения (бл. 25 Анн. 8-II гор. 270 м, бл. 6 Анн. 7-II-I гор. 170 м, бл. 26 Анн. 6-II гор. 230 м); №04-3.1.4-9-204 от 11.07.2019 г. ПО «Жезказганцветмет», Геомеханический отдел ТОО «Корпорация Казахмыс». 9 с.
19. Геомеханическое заключение и рекомендации по вопросу доработки запасов в зоне сдвижения и на примыкании к ней для выемочных единиц Анненского рудника. Горно-геомеханическое управление ПО «Жезказганцветмет»; № 67-21-944 от 1 октября 2008 г. 7 с.
20. Заключение на ведение горных работ в прилегании к обрушенным в 2004 г. участкам Анненского рудника (бл. 3-3бис Анн-2-II-I, бл. 7 Анн-2-IV. Бл. 31 Анн-2-II-I, бл. 12 бис Анн-3-II), №03-23-21-747 от 21 июля 2009 г. ПО «Жезказганцветмет», Горно-геомеханическое управление. 2 с.
21. Заключение по ведению горных работ на участках Анненского рудника в 150-метровой зоне прилегания к мульде сдвижения 2004 г. (Бл. 6 Анн. 7-I, бл. 11-юг Анн. 3-IV, бл. 25-юг Анн. 8-II, бл. 4-юг Анн. 4-II-I), № 03-23-21-691 от 25 июня 2009 г. ПО «Жезказганцветмет», Горно-геомеханическое управление, Филиал ТОО «Корпорация Казахмыс». 3 с.
22. Заключение на ведение горных работ в прилегании к обрушенным в 2004 г. участкам Анненского рудника (ГПР бл. 12 зал. Анн-3-II, бл. 11 юг зал. Анн-2-IV). №03-23-21-1331 от 14 декабря 2009 г. Горно-геомеханическое управление, Маркшейдерско-геомеханический департамент корпорации «Казахмыс». 2 с.
23. Геомеханическое заключение по ведению горных работ на участках Анненского рудника в мульде сдвижения и на прилегании к ней. №03-25-1366 от 26 декабря 2009 г. Горно-геомеханическое управление, Маркшейдерско-геомеханический департамент корпорации «Казахмыс». 5 с.
24. Отчет, заключительный за 2022 год по теме НИР «Исследование соответствия определения параметров и системы отработки в условиях шахты «Анненская» Восточно-Жезказганского рудника» (этап 2) / Рук. проекта Бекбергенов Д.К., ТОО «КазНИИцветмет». Алматы, 2022. 347 с.

#### References

1. Ordin A.A. et al. Development of a room-and-pillar mining system below the boundary of rock bursts in the Denisovskaya mine. *Fundamentalnye i prikladnye voprosy gornykh nauk* [Basic and Applied Issues of Mining Sciences]. 2014;1(1):273-279. (In Russ.)
2. Zhikalyak N.V. A new indicator of gas content in sandstones. *Geotekhnicheskaya mekhanika* [Geotechnical Mechanics]. Dnepropetrovsk: Institute of Ge-

- otechnical Mechanics, the National Academy of Sciences of Ukraine. 2003;(42):238-246. (In Russ.)
3. Imanskipova B.B., Sdvyzhkova O.O., Isabayev K.Z., Shakieva G. The combined method for assessing risk factors in underground construction. Scientific Bulletin of the National Mining University. 2020;(3):53-58. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-3/053>
  4. Dutton S.P. Play analysis and leading edge oil-reservoir development methods in the Permian Basin: Increased recovery through advanced technologies. AAPG Bulletin. 2005;89(5):553-576. DOI:10.1306/12070404093
  5. Xu C., Zhou KP, Xiong X., Gao F., Lu Y. Prediction of mining induced subsidence by sparrow search algorithm with extreme gradient boosting and TOPSIS method. Acta Geotechnica. 2023;18(9):1-17.
  6. Evans V., Mike Mayev. Development of the Saskatchewan potash mines. CIM Convention-Montreal. Canada 2011.
  7. Zhou J., Zhu S.L., Qiu Y.G., Armaghani D.J., Zhou A.N., Yong W.X. Predicting tunnel squeezing using support vector machine optimized by whale optimization algorithm. Acta Geotechnica. 2022;17(4):1343-1366.
  8. Tishkov M., Potvin Y., Jakubec J. Evaluation of caving as a mining method for the Udachnaya underground diamond mine project. Proceedings of the Fourth International Symposium on Block and Sublevel Caving. Australian Centre for Geomechanics, Perth, 2018, pp. 835-846.
  9. Couto P.M., Green S. Improving the mining efficiencies utilising a combination of elongates and packs at Unisel Mine. Welkom: AMMSA On-line Publication, 2018, pp. 1-12.
  10. Sainsbury D.P., Sainsbury B.L., Board M.P., Loring D.M. Numerical back-analysis of structurally controlled cave initiation and propagation at the Henderson Mine. The 45th US Rock Mechanics. Geomechanics Symposium, San Francisco, CA, June 26-29, 2011.
  11. Guéguen Y., Kachanov M. Effective elastic properties of cracked rocks – An overview. Leroy Y.M., Lehner F.K. (eds.) Mechanics of Crustal Rocks. CISM Courses and Lectures. Vienna: Springer, 2011, pp. 73-126.
  12. Woo K., Eberhardt E., A. van As. Characterization and empirical analysis of block caving induced surface subsidence and macro deformations. ROCKENG09: Proceedings of the 3rd CANUS Rock Mechanics Symposium, Toronto, May 2009. Diederichs M., Grasselli G. (eds.)
  13. Bekbergenov D.K. Features of technology of repeated mining of ores in conditions of a collapsed underground area using the example of the Zhezkazgan deposit. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskyy zhurnal)* [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. 2017;(special issue 3):3-14. (In Russ.)
  14. Analysis of the possibility of working out the reserves of the Annenskaya and 57 mines located in the shift trough. No.04-3.1.4-9-52 dated 16.10.19. Geomechanical Department of the Surveying and Geomechanical Service, Mine Management of MMC LLP Kazakhmys Corporation. 8 p. (In Russ.)
  15. Survey information of mining workings falling into the shift trough and 150m shift trough zone in 2004-2006 for the Annenskaya mine, the East Zhezkazgan Mine, dated 1-31.10.2014. 12 p. (In Russ.)
  16. On the issue of prospects of developing mining operations in the Annensky district. General condition of the shift trough area in 2004, 2006 and the 150-meter zone around it. No.08-23-21-618 dated August 12, 2011. Geomechanical Administration of LLP Kazakhmys Corporation. 11 p. (In Russ.)
  17. Expert assessment of the possibility of working out reserves within the shift zones formed as a result of collapses in 2004-2006 in the fields of the East and Annenskaya mines. Head of the Laboratory of Geodynamics and Rock Pressure, Institute of Mining, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Professor O.V. Zoteev, DrSc (Eng.), dated 04.12.2009. 7 p. (In Russ.)
  18. Assessment of involvement in repeated mining of blocks of upper horizons adjacent to the shift trough from the east (block 25 of Annenskaya mine (Ann.) 8-II, 270 m horizon; block 6 of Ann. 7-II-I, 170 m horizon; block 26 of Ann. 6-II, 230 m horizon). No. 04-3.1.4-9-204 dated 11.07.2019. JSC Zhezkazgantsvetmet, Geomechanical Department, LLP Kazakhmys Corporation. 9 p. (In Russ.)
  19. Geomechanics opinion and recommendations on the issue of final extraction of reserves in the shift zone and mining units adjacent to it in the Annenskaya mine. Mining and Geomechanical Administration of JSC Zhezkazgantsvetmet. No. 67-21-944 dated 01.10.2008. 7 p. (In Russ.)
  20. Opinion on conducting mining operations in the vicinity of collapsed sections of the Annenskaya mine in 2004 (block 3-3bis, Ann-2-II-I; block 7 Ann-2-IV; block 31 Ann-2-II-I; block 12 bis Ann-3-II), No.03-23-21-747 dated 21.07.2009. Mining and Geomechanical Administration of JSC Zhezkazgantsvetmet. 2 p. (In Russ.)
  21. Opinion on conducting mining operations in the sections of the Annenskaya mine in the 150-meter zone adjacent to the shift trough in 2004 (block 6 of Ann. 7-I; block 11-south Ann. 3-IV; block 25-south Ann. 8-II, block 4-south Ann. 4-II-I), No.03-23-21-691 dated 25.06.2009. Mining and Geomechanical Administration of JSC Zhezkazgantsvetmet, Branch of LLP Kazakhmys Corporation. 3 p. (In Russ.)
  22. Opinion on conducting mining operations in the vicinity of collapsed sections of the Annenskaya mine in 2004 (Mining and development of block 12 Ann-3-II; block 11 south Ann-2-IV). No.03-23-21-1331 dated 14.12.2009. Mining and Geomechanical Administra-

- tion, Surveying and Geomechanical Division of Kazakhmys Corporation. 2 p. (In Russ.)
23. Geomechanics opinion on conducting mining operations in the sections of the Annenskaya mine in the shift trough and adjacent areas. No.03-25-1366 dated 26.12.2009. Mining and Geomechanical Administration, Surveying and Geomechanical Division of Kazakhmys Corporation. 5 p. (In Russ.)
24. The 2022 Final Report on the R&D subject: “Study on correspondence of the parameter determination and the mining systems in the Annenskaya mine of the East Zhezkazgan Mine” (stage 2). Project Manager: Bekbergenov D.K., LLP Kazakhstan Scientific and Research Institute for Non-Ferrous Metallurgy. Almaty, 2022, 347 p. (In Russ.)

Поступила 12.03.2024; принята к публикации 10.06.2024; опубликована 30.09.2024  
Submitted 12/03/2024; revised 10/06/2024; published 30/09/2024

**Бекбергенов Досанбай Калдарбаевич** – кандидат технических наук, заведующий лабораторией «Комплексное освоение недр», Институт горного дела имени Д.А. Кунаева, Алматы, Республика Казахстан. Email: kdbekbergen@mail.ru. ORCID 0000-0001-6276-3474

**Джангулова Гульнар Кабатаевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры картографии и геоинформатики, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Республика Казахстан. Email: gulnarzan@gmail.com. ORCID 0000-0002-7866-1031

**Жанакоева Раиса Кульмахановна** – доктор PhD, ассоциированный профессор, Казахский автомобильно-дорожный институт имени Л.Б. Гончарова, Алматы, Республика Казахстан. Email: zhanakova\_raisa@mail.ru. ORCID 0000-0003-0845-8449

**Абиев Бахытжан Аблхасимович** – кандидат технических наук, ассоциированный профессор, Казахский автомобильно-дорожный институт имени Л.Б. Гончарова, Алматы, Казахстан. Email: bakhitjan\_aa1971@mail.ru. ORCID 0000-0002-0010-9116

**Dosanbai K. Bekbergenov** – PhD (Eng.), Head of the Laboratory of Integrated Development of Mineral Resources, Kunaev Institute of Mining, Almaty, the Republic of Kazakhstan. E-mail: kdbekbergen@mail.ru. ORCID 0000-0001-6276-3474

**Gulnar K. Jangulova** – PhD (Eng.), Associate Professor of the Cartography and Geoinformatics Department, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, the Republic of Kazakhstan. E-mail: gulnarzan@gmail.com. ORCID 0000-0002-7866-1031

**Raissa K. Zhanakova** – PhD, Associate Professor, Goncharov Kazakh Automobile and Road Institute, Almaty, the Republic of Kazakhstan. E-mail: zhanakova\_raisa@mail.ru. ORCID 0000-0003-0845-8449

**Bakhytzhana A. Abiyev** – PhD (Eng.), Associate Professor, Goncharov Kazakh Automobile and Road Institute, Almaty, the Republic of Kazakhstan. E-mail: bakhitjan\_aa1971@mail.ru. ORCID 0000-0002-0010-9116



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

УДК 622.765

DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-3-33-42



## РАЗРАБОТКА МЕТОДА И УСТАНОВКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАЗМЕРА ПУЗЫРЬКОВ В УСЛОВИЯХ, МОДЕЛИРУЮЩИХ РЕЖИМ ПАРОВОЗДУШНОЙ ФЛОТАЦИИ

Евдокимов С.И.<sup>1</sup>, Герасименко Т.Е.<sup>1</sup>, Горлова О.Е.<sup>2,3</sup>, Орехова Н.Н.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, Россия

<sup>2</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

<sup>3</sup> Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова РАН, Москва, Россия

**Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы).** Работа направлена на повышение селективности разделения минералов методом флотации и увеличение полноты извлечения ценного компонента за счет новых способов построения схемы флотации и режима аэрации пульпы. **Цель работы.** Исследование изменения размера паровоздушных пузырьков при их внезапном контакте с холодной жидкостью в процессах флотации. **Используемые методы.** Разработан метод и установка для измерения размера пузырьков в условиях, моделирующих режим паровоздушной флотации. **Новизна.** Обосновано, что размер пузырька может быть определен по объему газовой фазы, отнесенной к числу индукционных сигналов, вызванных движением паровоздушного пузырька («немагнитной дырки») вдоль витков катушек индуктивности в магнитной жидкости, квазиутяжеленной внешним неоднородным магнитным полем. Величина самого индукционного сигнала зависит от размера паровоздушного пузырька. **Результат.** Экспериментально установлено, что при увеличении температуры на границе раздела фаз газ-жидкость за счет теплоты конденсации водяного пара размер пузырьков уменьшается в 2-2,5 раза. Разработана технология обогащения золотосодержащих руд, отличительной особенностью которой является выделение черного концентрата в «три приема» с использованием режима аэрации пульпы паровоздушной смесью в течение короткого времени (15-25% от общего). Натурные эксперименты выполнены на руде Олимпиадинского месторождения. **Практическая значимость.** При использовании разработанной технологии прирост извлечения золота составил 2,72% (за счет уменьшения содержания золота в хвостах от 0,514 до 0,409 г/т) при увеличении качества концентрата от 72,94 до 97,07 г/т. Важным преимуществом новой технологии является уменьшение на 24,9 отн. % выхода концентрата, направляемого на дорогостоящую гидрометаллургическую переработку.

**Ключевые слова:** руда, золото, флотация, струйная схема, паровоздушная смесь, размер пузырька, измерение, магнитная жидкость, показатели флотации

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках соглашения № 23-27-00093 «Теоретическое и экспериментальное обоснование механизма поверхностных сил в процессах коагуляции и флотации в условиях теплового воздействия на смачивающие пленки для создания и промышленного освоения технологических процессов эффективного извлечения микродисперсией золота из руд и россыпей».*

© Евдокимов С.И., Герасименко Т.Е., Горлова О.Е., Орехова Н.Н., 2024

### Для цитирования

Разработка метода и установки для измерения размера пузырьков в условиях, моделирующих режим паровоздушной флотации / Евдокимов С.И., Герасименко Т.Е., Горлова О.Е., Орехова Н.Н. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №3. С. 33-42. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-33-42>



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

# DEVELOPMENT OF A BUBBLE SIZE MEASUREMENT METHOD AND SYSTEM UNDER CONDITIONS SIMULATING THE VAPOR-AIR FLOTATION MODE

Evdokimov S.I.<sup>1</sup>, Gerasimenko T.E.<sup>1</sup>, Gorlova O.E.<sup>2,3</sup>, Orekhova N.N.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia

<sup>2</sup> Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

<sup>3</sup> Melnikov Institute of Comprehensive Subsoil Development, the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**Abstract. Problem Statement (Relevance).** The research is aimed at improving the selectivity of mineral separation by a flotation method and increasing the completeness of recovery of a valuable component due to new methods of flotation chart design and a pulp aeration mode. **Objectives.** The article presents the study on changes in the size of vapor-air bubbles at their sudden contact with cold liquid in flotation processes. **Methods Applied.** The authors developed a bubble size measurement method and system under conditions simulating the vapor-air flotation mode. **Originality.** The article contains the rationale describing that the size of a bubble can be determined by the volume of the gas phase related to the number of induction signals caused by the motion of a vapor-air bubble (“nonmagnetic hole”) along the turns of inductance coils in a magnetic liquid made quasi-heavy by an external inhomogeneous magnetic field. The value of the induction signal depends on the size of the vapor-air bubble. **Result.** It has been experimentally established that with increasing temperature at the gas-liquid interface due to the heat of condensation of water vapor, the size of bubbles decreases by 2.0-2.5 times. The authors developed technology of gold-bearing ore enrichment, whose distinctive feature was the separation of a rough concentrate in “three steps” using the mode of pulp aeration with a vapor-air mixture for a short time (15-25% of the total period). Field experiments were performed on ore from the Olimpiada deposit. **Practical Relevance.** Using the developed technology, the increase in gold recovery was 2.72 % (due to the reduction of gold content in tailings from 0.514 to 0.409 g/t) with an increase in the concentrate quality from 72.94 to 97.07 g/t. An important advantage of the new technology is a 24.9% reduction in the relative yield of the concentrate supplied for expensive hydrometallurgical processing.

**Keywords:** ore, gold, flotation, jetting scheme, vapor-air mixture, bubble size, measurement, magnetic fluid, flotation performance

**Acknowledgments:** *The study was supported by the Russian Science Foundation under agreement No.23-27-00093 “Theoretical and experimental substantiation of the mechanism of surface forces in the processes of coagulation and flotation under conditions of the thermal action on wetting films for designing and industrial development of technological processes for the efficient extraction of gold microdispersions from ores and placers”.*

## For citation

Evdokimov S.I., Gerasimenko T.E., Gorlova O.E., Orekhova N.N. Development of a Bubble Size Measurement Method and System Under Conditions Simulating the Vapor-Air Flotation Mode. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 3, pp. 33-42. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-33-42>

## Введение

При флотации взаимодействие минералов с жидкой фазой пульпы заключается в образовании на их поверхности пленок жидкости [1-5]. В пленках различные параметры структуры жидкости отличаются от объемных значений [6-8]. Изменения структуры жидкости являются причиной появления сил, которые могут быть как силами отталкивания (в случае гидрофильных поверхностей), так и силами гидрофобного притяжения; закон их изменения близок к экспоненциальному [9-11]. Только за пределами радиуса действия поверхностных сил жидкость приобретает свойства изотропной объемной фазы [12-16]. Дальнейшее действие сил гидрофобного притяжения объясняется образованием между поверхностями термодинамически устойчивых микрополостей, заполненных парами несущей жидкости [17-20]. Присутствием

газовых зародышей объясняют пониженную, по сравнению с объемной, плотность воды в граничном слое жидкости [21-24].

Гидрофобное притяжение – процесс эндотермический. Всякое нарушение гидрофобного взаимодействия будет процессом экзотермическим, который будет увеличиваться с ростом температуры. Экзотермичность же является следствием увеличения концентрации молекул, не соединенных водородными связями (по Немети и Шерага, Грьетгейму и Крог-Мое [25, 26]), движения молекул в процессе разрыва водородных связей из кристаллической решетки в полости (по Самойлову, Дэнфорду и Леви [25, 26]), сближения ближайших соседей молекулы за счет изгиба водородных связей (по Поплу [25, 26]).

В граничных слоях пузырьков плотность воды понижена, а диполи воды ориентированы параллель-

но поверхности, как и в граничных слоях типично гидрофобных твердых поверхностей [27, 28]. Следовательно, для изменения результата флотации достаточно увеличить температуру воды в граничных слоях пузырьков, внутри которых локализовано действие поверхностных сил (от 1 до 65 нм) [29, 30]. С этой целью в настоящей работе воздух, подаваемый во флотомашину для аэрации пульпы, смешивают с горячим (> 104°C) водяным паром.

Целью работы является исследование изменения размера пузырьков при их заполнении горячим водяным паром и влияние этого эффекта на технологические показатели флотации золотосодержащих руд.

### Теоретические положения

Размер пузырька измеряли по объему газовой фазы, отнесенной к числу индукционных сигналов, вызванных движением паровоздушной смеси вдоль витков катушек индуктивности в квазиутяжеленной внешним неоднородным магнитным полем магнитной жидкости (рис. 1). Величина самого индукционного сигнала зависит от размера паровоздушного пузырька – «немагнитной дырки» в объеме ферромагнитной жидкости.

На немагнитную частицу в магнитной жидкости действует магнитная пондеромоторная сила  $\vec{F}$ , описываемая формулой Розенцвейга:

$$\vec{F} = -\mu_0 \oint_S \left( \int_0^H M(H') dH' \right) \vec{n} dS - \mu_0 \oint_S \frac{M_n^2}{2} \vec{n} dS, \quad (1)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  – магнитная постоянная, Гн/м;  $S$  – поверхность тела;  $H$  – напряженность магнитного поля, А/м;  $M$  – намагниченность магнитной жидкости, А/м;  $\vec{n}$  – вектор нормали к поверхности тела  $S$ ;  $M_n = \vec{M} \cdot \vec{n}$ .

Для магнитной пондеромоторной силы  $\vec{F}$  в неоднородном магнитном поле

$$\vec{F} = \text{grad} (\vec{\rho}_m \cdot \vec{B}), \quad (2)$$

или с учетом того, что при  $V \rightarrow 0$

$$\vec{J} = \lim \left( \frac{\vec{\rho}_m}{V} \right). \quad (3)$$

Получим

$$\vec{F} = \text{grad} (\vec{J} \cdot \vec{B}), \quad (4)$$

где  $\vec{\rho}_m$  – магнитный момент частицы, Дж/Тл;  $\vec{B}$  – магнитная индукция, Тл;  $\vec{J}$  – вектор намагниченности, А/м.

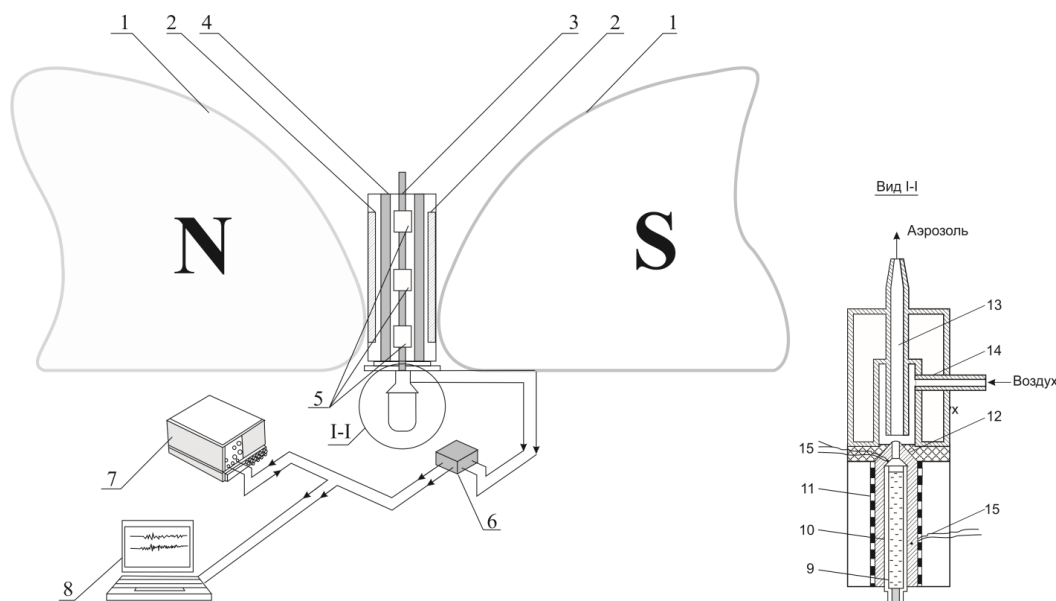


Рис. 1. Измерительная система: 1 – полюсные наконечники магнитопровода электромагнитной системы; 2 – металлические вставки; 3 – стеклянная трубка с ферромагнитной жидкостью и системой катушек индуктивности; 4 – ферромагнитная жидкость; 5 – катушки индуктивности; 6, 7 – усилитель сигнала с цифровым осциллографом; 8 – компьютер; 9 – патрон; 10 – медная трубка (Ø10 мм); 11 – нагреватель; 12 – канал (Ø1,4 мм); 13 – камера смешения с соплом; 14 – штуцер; 15 – термопара

Fig. 1. A measurement system: 1 is pole tips of the magnetic conductor of the electromagnetic system; 2 are metallic inserts; 3 is a glass tube with ferromagnetic liquid and a system of inductance coils; 4 is ferromagnetic liquid; 5 is inductance coils; 6, 7 is a signal amplifier and a digital oscilloscope; 8 is a computer; 9 is a holder; 10 is a copper tube (Ø 10 mm); 11 is a heater; 12 is a channel (Ø 1.4 mm); 13 is a mixing chamber with a nozzle; 14 is a coupling; 15 is a thermocouple

При совпадении по направлению вектора напряженности магнитного поля  $\vec{H}$  и вектора намагниченности  $\vec{J}$  имеем

$$\vec{F} = \vec{F}_x + \vec{F}_y = J_s \left( \frac{\partial B_x}{\partial x} \cos \beta + \frac{\partial B_y}{\partial x} \sin \beta \right) \vec{i} + J_s \left( \frac{\partial B_x}{\partial y} \cos \beta + \frac{\partial B_y}{\partial y} \sin \beta \right) \vec{j}, \quad (5)$$

где  $\beta$  – угол между осью  $Ox$  и вектором магнитной индукции  $\vec{B}$ .

Следствием появления в объеме ферромагнитной жидкости паровоздушного пузырька – «дырки» – является искажение начального магнитного потока, а движение немагнитного включения – индукционного сигнала в катушках. Индуцированный в катушках ток вызывал на осциллограмме периодические всплески, частота появления которых соответствовала числу, а амплитуда – размеру пузырька.

### Материалы и оборудование

Измерения в ферромагнитной жидкости выполнены с использованием электромагнитной системы сепаратора ФГС-40 (рис. 2).

В работе использованы образцы магнитной жидкости, синтезированной на основе наномagnetита, полученного методом гетерогенной химической конденсации (по Зигмонди) – путем увеличения надмолекулярного размера устойчивых центров конденсации до 7-10 нм (с соблюдением правила Веймарна). Его агрегативную устойчивость обеспечивали методом Флер-Ликлема, добавляя к наномagnetиту с незащищенной стабилизатором поверхностью наномagnetит с двойным избытком стабилизатора на поверхности (табл. 1).

Таблица 1. Физические параметры магнитной жидкости типа наномagnetит+керосин (ТС-1)+олеиновая кислота  
Table 1. Physical parameters of magnetic liquid consisting of nano-magnetite +kerosene (ТС-1)+oleic acid

Магнитные и физико-химические свойства	
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,4
Концентрация частиц:	
об. %	12
м <sup>-1</sup>	1,61 · 10 <sup>23</sup>
Намагниченность насыщения, кА/м	50,7
Начальная магнитная восприимчивость	6,1
Динамическая вязкость, мПа·с	27,3

Результаты исследования намагниченности наномagnetита, полученного методом гетерогенной химической конденсации, приведены на рис. 3.

Конструкция устройства для генерации паровоздушного пузырька в ферромагнитной жидкости (см. рис. 1, вид I-I) моделирует работу форсунки, в которой рабочий поток пара инжектирует поток воздуха с образованием пузырьков, заполненных горячим водяным паром. В устройстве наполненный водой патрон 9 из нержавеющей стали вставлен в толстостенную (с толщиной стенки 4 мм) медную трубку 10 с внутренним диаметром 10 мм. Медная трубка внутри с наполненным водой патроном помещена в нагреватель 11. Через канал 12 диаметром 1,4 мм поток пара из патрона 9 поступает в камеру смешения с соплом 13; патрон 9 и камера смешения 13 установлены соосно с зазором в 2 мм. Через штуцер 14 в этот зазор в камеру смешения 13 поступает воздух. Циркулирующей воды от термостата типа У-10 осуществляют термостатирование (с контролем температуры термопарами 15) камеры смешения 13.

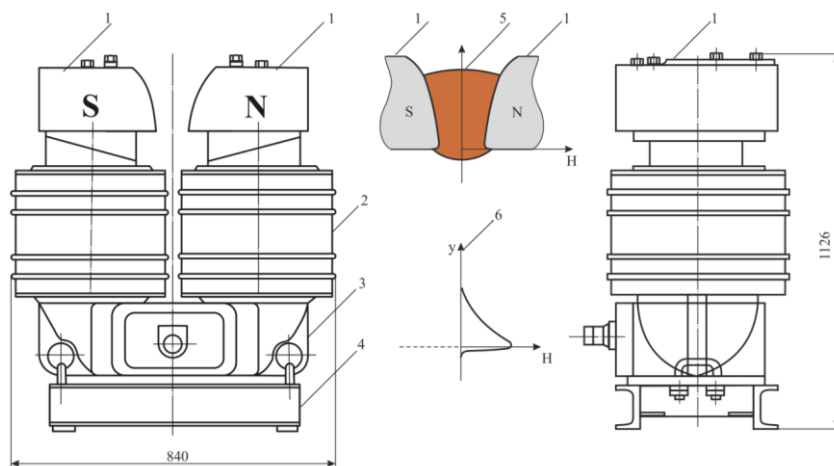


Рис. 2. Магнитогравиметрический сепаратор: 1 – полюсные наконечники с катушками возбуждения 2 и магнитопроводом 3 на раме 4; 5 – слой ферромагнитной жидкости; 6 – изменение напряженности магнитного поля по высоте слоя ферромагнитной жидкости

Fig. 2. A magnetic gravity separator: 1 is pole tips with excitation coils 2 and magnetic conductor 3 on frame 4; 5 is a layer of ferromagnetic liquid, 6 is change in magnetic field strength along the height of the ferromagnetic liquid layer

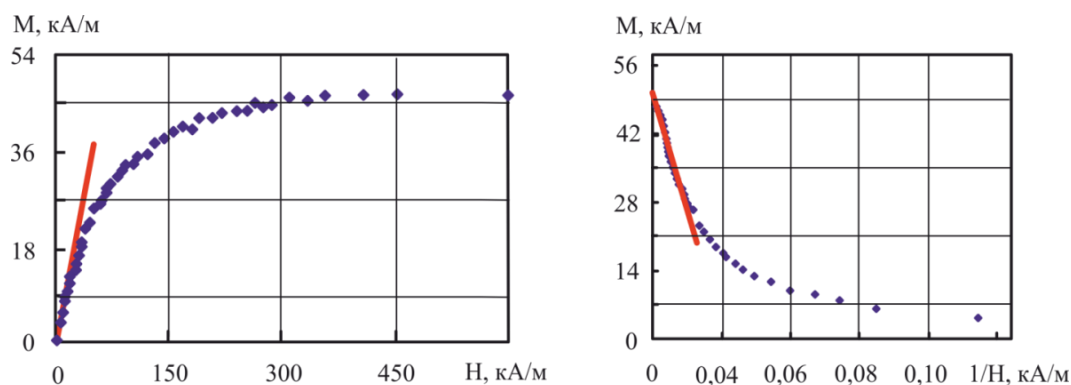


Рис. 3. Кривые намагничивания магнитной жидкости от напряженности магнитного поля  
Fig. 3. Magnetization curves of magnetic liquid from magnetic field strength

Пневмосистема для подачи воздуха приведена на рис. 4. Сжатый воздух в сатурационную колонку 8 (с фильтром Шотта № 4 тонкой очистки 6 и резиновой манжетой 7) попадает из баллона 1 через редуктор высокого давления 2, фильтр ФВ-2 грубой очистки 3 и редуктор РДВ-2 низкого давления 4. Слянки Дрекслера 9 и 12 предусмотрены для каплеулавливания и возможных выбросов воды из сатуратора 8 и газового реометра 11. Зажим Мора 5 служит для предотвращения попадания капельного уноса из сатуратора 8 в систему механизмов 1-4 и вместе с регулируемым зажимом 10 сглаживает пульсации давления. Стеклопипетты 14 и 15 предназначены для выравнивания сопротивлений в пневмосистеме и генераторе пузырьков.

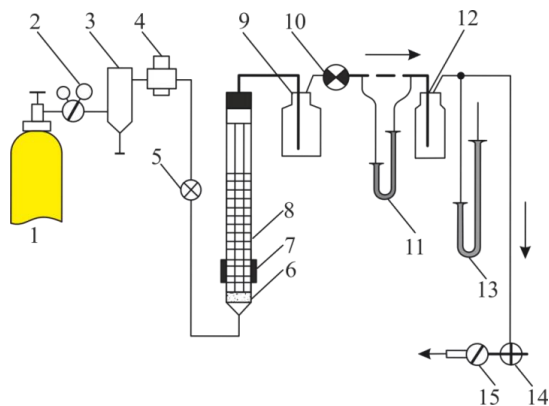


Рис. 4. Пневмосистема для подачи воздуха  
Fig. 4. Air supply pneumatic system

### Результаты и их обсуждение

На рис. 5 приведена осциллограмма, полученная при барботировании ферромагнитной жидкости пузырьками, заполненными паровоздушной смесью с температурой 95°C.

На рис. 6 приведены гистограммы, полученные при барботировании ферромагнитной жидкости пузырьками воздуха, заполненными паром с температурой 20°C (а) и 104°C (б).

Влияние увеличения температуры пара проявляется в уменьшении размера пузырька при его внезапном контакте с холодной жидкостью.

Эффективность разрабатываемой технологии оценена по результатам флотации сульфидных руд Олимпиадинского месторождения (с содержанием 3,10 г/т Au). При определении рациональных расходов флотационных реагентов использовали метод планирования эксперимента и результаты предыдущих исследований [31-35].

Базовая схема флотации руд включала цикл флотации первичной руды и цикл флотации промпродуктов. Первый цикл состоял из операции основной флотации с двумя перемычками выделенного черного концентрата, а также две операции контрольной флотации на хвостах основной операции флотации. Дофлотацию золота осуществляли из промпродукта, составленного из хвостов I перемычки и концентрата I контрольной флотации. В результате при выходе концентрата 3,57% с содержанием золота 72,94 г/т в него извлечено 84,0% металла.

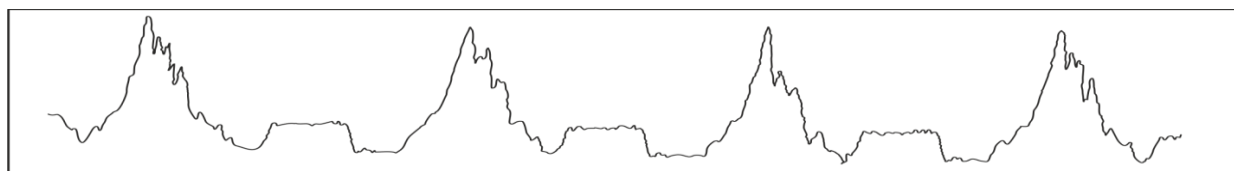


Рис. 5. Характерные всплески на осциллограмме, вызванные током, индуцированным в измерительных катушках при появлении паровоздушного пузырька в объеме ферромагнитной жидкости  
Fig. 5. Characteristic bursts on the oscillogram caused by current induced in the measuring coils by a vapor-air bubble in the volume of ferromagnetic liquid

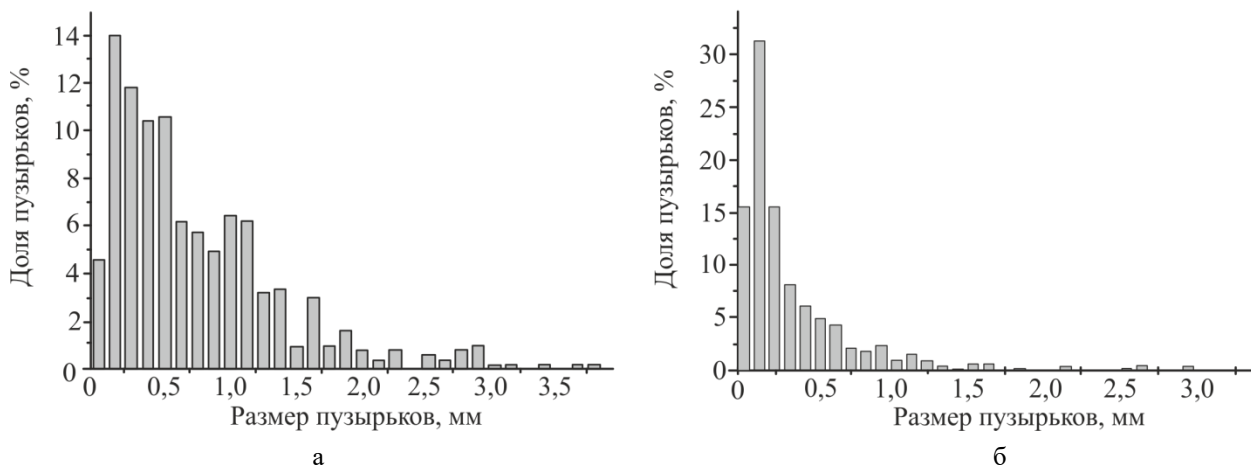


Рис. 6. Гистограммы распределения пузырьков по крупности  
Fig. 6. Histograms of a bubble size distribution

Увеличение содержания золота в питании флотации добивались путем струйного противоточного движения черного концентрата и исходного питания. Уменьшение доли крупных пузырьков получено за счет перехода от аэрации пульпы воздухом к паровоздушной флотации. Качественно-количественная схема цикла основной флотации приведена на рис. 7.

В цикле основной флотации при выделении черного концентрата по схеме струйной флотации в режиме аэрации пульпы паровоздушной смесью операционное извлечение золота увеличилось от 76,27 отн. % (I струя флотации) до 91,36 отн. % (III струя флотации).

После отработки реagentного режима операции основной флотации поставлен опыт, моделирующий замкнутый цикл процесса (из 7 параллельных навесок руды). Установлено, что при переходе на технологию с выделением черного концентрата в «три приема» (см. рис. 7) прирост извлечения золота в готовый концентрат составил 2,72 % (содержание золота в хвостах уменьшилось от 0,514 до 0,409 г/т) при увеличении качества концентрата от 72,94 до 97,07 г/т. Важным технологическим эффектом от использования новой технологии является уменьшение на 24,9 отн. % выхода концентрата.

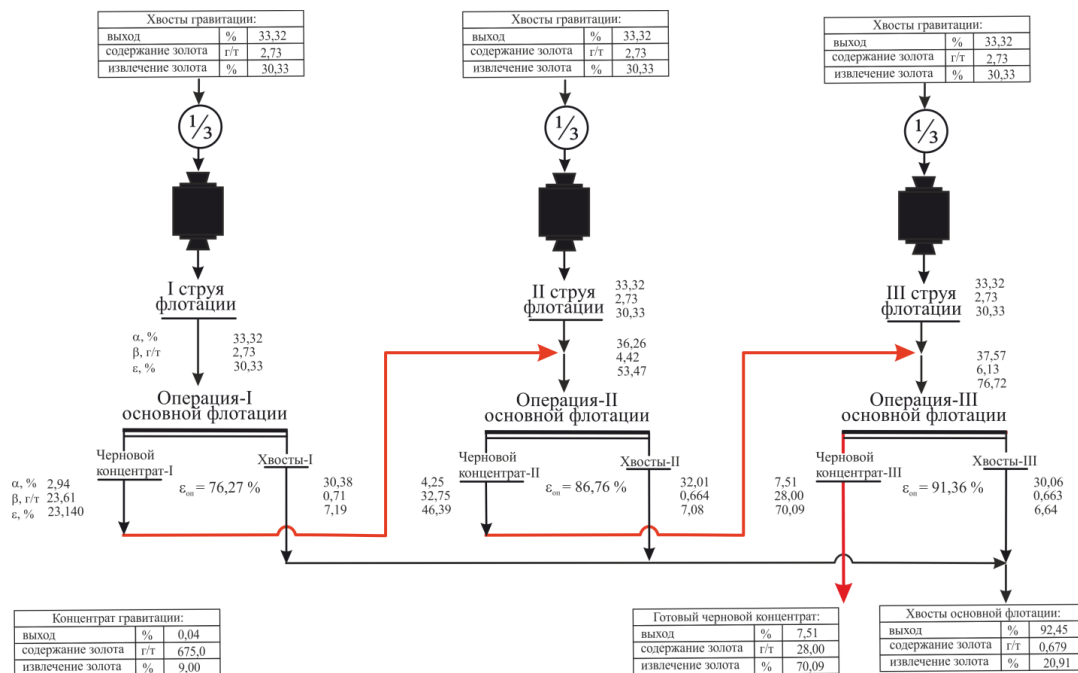


Рис. 7. Результаты выделения черного концентрата при флотации руд Олимпиадинского месторождения по схеме струйной флотации в режиме аэрации пульпы паровоздушной смесью

Fig. 7. Results of the rough concentrate separation at flotation of ores of the Olimpiada deposit according to the chart of the jet flotation and in the mode of pulp aeration with a vapor-air mixture

### Заключение

Для изменения результата флотации достаточно увеличить температуру воды в граничных слоях пузырьков, внутри которых локализовано действие поверхностных сил. В настоящей работе температуру воды в граничных слоях пузырьков повышали за счет теплоты конденсации горячего водяного пара. Для этого воздух, подаваемый (нагнетаемый воздуходувкой или засасываемый блоком-импеллером) во флотомашину для аэрации пульпы, смешивают с водяным паром ( $>104^{\circ}\text{C}$ ). При внезапном контакте с холодной пульпой пар в пузырьке конденсируется, и теплота конденсации за счет высокой теплопроводности воды в течение короткого промежутка времени отводится через границу раздела фаз газ-жидкость, затрачиваясь на нагрев воды в граничном слое пузырька.

Обосновано, что размер пузырька воздуха может быть определен по величине индукционного сигнала, появляющегося при пересечении им магнитного потока. Разработана установка и проведено измерение размера пузырька воздуха, заполненного водяным паром и всплывающего в магнитной жидкости вдоль индукционных катушек. Экспериментально установлено, что при увеличении температуры на границе раздела фаз газ-жидкость за счет теплоты конденсации водяного пара размер пузырьков уменьшается в 2-2,5 раза.

Натурные испытания разработанной технологии выполнены на пробе первичной (сульфидной) руды Олимпиадинского месторождения. Из результатов опыта, моделирующего замкнутый цикл процесса флотации (7 параллельных навесок руды), следует, что при выделении черного концентрата по схеме струйной флотации в режиме аэрации пульпы паровоздушной смесью технологическим эффектом является уменьшение на 24,9 отн. % выхода концентрата за счет увеличения содержания в нем золота от 72,94 до 97,07 г/т. Содержание золота в хвостах флотации уменьшилось от 0,514 до 0,409 г/т, что соответствует приросту извлечения золота в концентрат на 2,72 абс. %.

### Список источников

- Enhancing flotation separation of fine copper oxide from silica by microbubble assisted hydrophobic aggregation / Long Q., Wang H., Jiang F., Tan W., Xu Z. // *Minerals Engineering*. 2022, vol. 189, article 107863.
- Агеев А.И., Осипцов А.Н. Макро- и микрогидродинамика вязкой жидкости вблизи супергидрофобной поверхности // *Коллоидный журнал*. 2022. Т. 84. №4. С. 380-395.
- Товбин Ю.К. Линейное и поверхностное натяжения в области контактного угла трехагрегатной системы и время релаксации // *Журнал физической химии*. 2020. Т. 94. №8. С. 1131-1142.
- Кондратьев С.А., Мошкин Н.П. Поведение флотационного комплекса «минеральная частица-пузырек» в слабовязкой жидкости в процессе флотации // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2024. №1. С. 143-154.
- Единый подход к расклинивающему давлению в жидких и паровых прослойках в рамках метода функционала плотности / Щекин А.К., Гоства Л.А., Лебедева Т.С., Татьяненко Д.В. // *Коллоидный Журнал*. 2021. Т. 83. №2. С. 235-241.
- Teisala H., Butt H.J. Hierarchical structures for superhydrophobic and superoleophobic surfaces // *Langmuir: the ACS journal of surfaces and colloids*. 2019, vol. 35, no. 33, pp. 10689-10703.
- Оценка протяженности граничных слоев воды у поверхности частиц монодисперсного золя кремнезема в 0,15 М растворе NaCl при различных значениях pH / Голикова Е.В., Чернобережский Ю.М., Молодкина Л.М., Кузьмин В.Д. // *Коллоидный журнал*. 2018. Т. 80. №4. С. 387-398.
- Есипова Н.Е., Ицков С.В., Соболев В.Д. Гистерезис краевого угла на твердых кристаллических поверхностях // *Коллоидный журнал*. 2023. Т. 85. №2. С. 158-166.
- Nikolov A., Lee J., Wasan D. DLVO surface forces in liquid films and statistical mechanics of colloidal oscillatory structural forces in dispersion stability // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2023, vol. 313, article 102847.
- Емельяненко К.А., Емельяненко А.М., Бойнович Л.Б. Обзор современного состояния исследований адгезионных явлений на границах твердых тел с твердыми и жидкими водными средами // *Коллоидный журнал*. 2022. Т. 84. №3. С. 274-300.
- Gomez-Flores A., Solongo S.K., Heyes G.W. Bubble-particle interaction with hydrodynamics, XDLVO theory, and surface roughness for flotation in an agitated tank using CFD simulations // *Minerals Engineering*. 2020, vol. 152, article 106368.
- Unraveling the hydrophobic interaction mechanisms of hydrocarbon and fluorinated surfaces / Gong L., Wu F., Yang W., Huang C., Li W., Wang X., Wang J., Tang T., Zeng H. // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2023, vol. 635, pp. 273-283.
- Surface interaction mechanisms in mineral flotation: Fundamentals, measurements, and perspectives / Xie L., Wang J., Lu Q., Hu W., Zeng H. // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2021, vol. 295, article 102491.
- Guo H., Kovscek A.R. Investigation of the effects of ions on short-range non-DLVO forces at the calcite/brine interface and implications for low salinity oil-recovery processes // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2019, vol. 552, pp. 295-311.
- A review of non-DLVO interactions in environmental colloidal systems / Grasso D., Subramaniam K., Butkus M., Strevett K., Bergendahl J. // *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*. 2002, vol. 1, pp. 17-38.
- Bal V. Stability characteristics of nanoparticles in a laminar linear shear flow in the presence of DLVO and non-

- DLVO forces // *Langmuir: the ACS journal of surfaces and colloids*. 2019, vol. 35, no. 34, pp. 11175-11187.
17. Simonsen A.C., Hansen P.L., Klosgen B. Nanobubbles give evidence of incomplete wetting at a hydrophobic interface // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2004, vol. 73, pp. 291-299.
  18. Hampton M.A., Nguyen A.V. Nanobubbles and the nanobubble bridging capillary force // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2010, vol. 154, iss. 1-2, pp. 30-55.
  19. Danov K.D., Kralchevsky P.A. Capillary forces between particles at a liquid interface: General theoretical approach and interactions between capillary // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2010, vol. 154, no. 1-2, pp. 91-103.
  20. Jialin Wang J., Yoon R.-H., Morris J. AFM surface measurements conducted between gold surface treated in xanthate solutions // *International Journal of Mineral Processing*. 2013, vol. 122, pp. 13-21.
  21. Interaction force between an air bubble and a hydrophilic spherical particle in water, measured by the colloid probe technique / Englert A.H., Krasowska M., Formasiero D., Raiston J., Rubio J. // *International Journal of Mineral Processing*. 2009, vol. 92, no. 3-4, pp. 121-127.
  22. Attraction between hydrophobic surfaces studied by atomic force microscopy / Nguyen A., Nalaskowski J., Miuller J.D., Butt H.-J. // *International Journal of Mineral Processing*. 2003, vol. 72, iss. 1-4, pp. 215-225.
  23. Surface nanobubbles on the rare earth fluorocarbonate mineral synchysite / Owens C.L., Schachb E., Heinigb T., Rudolphb M., Nasha G.R. // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2019, vol. 552, pp. 66-71.
  24. Aqueous dispersions of nanobubbles: Generation, properties and feature / Azevedo A., Etchepare R., Calgaroto S., Rubio J. // *Minerals Engineering*. 2016, vol. 94, pp. 29-37.
  25. Interfacial water structure and the wetting of mineral surfaces / Miller J.D., Wang X., Jin J., Shrimali K. // *International Journal of Mineral Processing*. 2016, vol. 156, pp. 62-68.
  26. Unusual properties of water at hydrophilic/hydrophobic interfaces / Gunko V.M., Turov V.V., Bogatyrov V.M., Zarko V.I., Chuiko A.A. // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2005, vol. 118, iss. 1-3, pp. 125-172.
  27. Smith A.M., Borkovec M., Trefalt G. Forces between solid surfaces in aqueous electrolyte solutions // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2020, vol. 275, 102078.
  28. Studying flotation of gold microdispersions with carrier minerals and pulp aeration with a steam-air mixture / Evdokimov S.I., Golikov N.S., Pryalukhin A.F., Kondratiev V.V., Mishedchenko A., Kuzina A.V., Bryukhanova N.N., Karlina A.I. // *Minerals*. 2024, vol. 14, no. 1, pp. 108.
  29. Studying the flotation of gold-bearing ores using carrier minerals / Evdokimov S.I., Golikov N.S., Zadkov D.A., Voitovich E.V., Kondratiev V.V., Petrovskiy A.A., Konyukhov V.Y., Gladkikh V.A. // *Minerals*. 2024, vol. 14, no. 1, pp. 88.
  30. Механизм коагуляции в условиях флотации микродисперсий золота минералами-носителями / Евдокимов С.И., Гусева Е.А., Константинова М.В., Вайтекунене Е.Л., Филюшина Е.В. // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2023. №11-1. С. 190-206.
  31. Поисковые исследования собирателя для повышения извлечения золота в медном цикле флотации колчеданных и порфириновых руд / Сабанова М.Н., Леонтьева Е.В., Орехова Н.Н., Горлова О.Е. // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2020. №4. С. 239-249.
  32. Повышение полноты извлечения золота из лежащих отходов переработки золотосодержащих руд / Горлова О.Е., Шадрунова И.В., Жилина В.А., Чекушина Т.В. // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2020. №1. С. 193-210. DOI: 10.46689/2218-5194-2020-1-1-193-210
  33. Влияние реагентов на основе диалкилдитиофосфатов на флотацию меди из пиритсодержащих шлаков / Сабанова М.Н., Орехова Н.Н., Горлова О.Е., Глаголева И.В. // *Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия*. 2018. №4. С. 4-14. DOI: 10.17073/0021-3438-2018-4-4-14
  34. Заварухина Е.А., Орехова Н.Н. Влияние дополнительного собирателя на селективность флотационного разделения сульфидов меди и цинка // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2017. №3. С. 305-311.
  35. Чантурия В.А., Шадрунова И.В., Горлова О.Е. Инновационные процессы глубокой и экологически безопасной переработки техногенного сырья в условиях новых экономических вызовов // *Устойчивое развитие горных территорий*. 2021. Т. 13. №2(48). С. 224-237. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-2-224-237

#### References

1. Long Q., Wang H., Jiang F., Tan W., Xu Z. Enhancing flotation separation of fine copper oxide from silica by microbubble assisted hydrophobic aggregation. *Minerals Engineering*. 2022;189:Article ID 107863.
2. Ageev A.I., Osiptsov A.N. Macro- and microhydrodynamics of viscous liquid near a superhydrophobic surface. *Kolloidnyi zhurnal [Colloid Journal]*. 2022;84(4):380-395. (In Russ.)
3. Tovbin Yu.K. Linear and surface tension in the contact angle region of a three-aggregate system and relaxation time. *Zhurnal fizicheskoy khimii [Journal of Physical Chemistry]*. 2020;94(8):1131-1142. (In Russ.)
4. Kondratyev S.A., Moshkin N.P. Behavior of the flotation complex "mineral particle-bubble" in low viscosity liquid in the process of flotation. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh [Physical and Technical Problems of*



- Mineral Resources Development]. 2024;(1):143-154. (In Russ.)
5. Shchekin A.K., Gostva L.A., Lebedeva T.S., Tatyankin D.V. A unified approach to disjoining pressure in liquid and vapor interlayers in the framework of the density functional method. *Kolloidnyi zhurnal* [Colloid Journal]. 2021;83(2):235-241. (In Russ.)
  6. Teisala H., Butt H.J. Hierarchical structures for superhydrophobic and superoleophobic surfaces. *Langmuir: the ACS Journal of Surfaces and Colloids*. 2019;35(33):10689-10703.
  7. Golikova E.V., Chernoberezhskiy Yu.M., Molodkina L.M., Kuzmin V.D. Assessment of the extent of water boundary layers near the surface of particles of monodisperse silica sol in 0.15 M NaCl solution at different pH values. *Kolloidnyi zhurnal* [Colloid Journal]. 2018;80(4):387-398. (In Russ.)
  8. Esipova N.E., Itskov S.V., Sobolev V.D. Edge angle hysteresis on solid crystalline surfaces. *Kolloidnyi zhurnal* [Colloid Journal]. 2023;85(2):158-166. (In Russ.)
  9. Nikolov A., Lee J., Wasan D. DLVO surface forces in liquid films and statistical mechanics of colloidal oscillatory structural forces in dispersion stability. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2023;313:Article ID 102847.
  10. Emelyanenko K.A., Emelyanenko A.M., Boinovich L.B. Review of the current state of research on the adhesion phenomena on the boundaries of solids with solid and liquid aqueous media. *Kolloidnyi zhurnal* [Colloid Journal]. 2022;84(3):274-300. (In Russ.)
  11. Gomez-Flores A., Solongo S.K., Heyes G.W. Bubble-particle interaction with hydrodynamics, XDLVO theory, and surface roughness for flotation in an agitated tank using CFD simulations. *Minerals Engineering*. 2020;152:Article ID 106368.
  12. Gong L., Wu F., Yang W., Huang C., Li W., Wang X., Wang J., Tang T., Zeng H. Unraveling the hydrophobic interaction mechanisms of hydrocarbon and fluorinated surfaces. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2023;635:273-283.
  13. Xie L., Wang J., Lu Q., Hu W., Zeng H. Surface interaction mechanisms in mineral flotation: Fundamentals, measurements, and perspectives. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2021;295:Article ID 102491.
  14. Guo H., Kovscek A.R. Investigation of the effects of ions on short-range non-DLVO forces at the calcite/brine interface and implications for low salinity oil-recovery processes. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2019;552:295-311.
  15. Grasso D., Subramaniam K., Butkus M., Strevett K., Bergendahl J. A review of non-DLVO interactions in environmental colloidal systems. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*. 2002;1:17-38.
  16. Bal V. Stability characteristics of nanoparticles in a laminar linear shear flow in the presence of DLVO and non-DLVO forces. *Langmuir: the ACS Journal of Surfaces and Colloids*. 2019;35(34):11175-11187.
  17. Simonsen A.C., Hansen P.L., Klosgen B. Nanobubbles give evidence of incomplete wetting at a hydrophobic interface. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2004;73:291-299.
  18. Hampton M.A., Nguyen A.V. Nanobubbles and the nanobubble bridging capillary force. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2010;154(1-2):30-55.
  19. Danov K.D., Kralchevsky P.A. Capillary forces between particles at a liquid interface: General theoretical approach and interactions between capillary. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2010;154(1-2):91-103.
  20. Jialin Wang J., Yoon R-H., Morris J. AFM surface force measurements conducted between gold surfaces treated in xanthate solutions. *International Journal of Mineral Processing*. 2013;122:13-21.
  21. Englert A.H., Krasowska M., Formasiero D., Raiston J., Rubio J. Interaction force between an air bubble and a hydrophilic spherical particle in water, measured by the colloid probe technique. *International Journal of Mineral Processing*. 2009;92(3-4):121-127.
  22. Nguyen A., Nalaskowski J., Miuller J.D., Butt H.-J. Attraction between hydrophobic surfaces studied by atomic force microscopy. *International Journal of Mineral Processing*. 2003;72(1-4):215-225.
  23. Owens C.L., Schachb E., Heinigb T., Rudolphb M., Nasha G.R. Surface nanobubbles on the rare earth fluorocarbonate mineral synchysite. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2019;552:66-71.
  24. Azevedo A., Etchepare R., Calgaroto S., Rubio J. Aqueous dispersions of nanobubbles: Generation, properties and feature. *Minerals Engineering*. 2016;94:29-37.
  25. Miller J.D., Wang X., Jin J., Shrimali K. Interfacial water structure and the wetting of mineral surfaces. *International Journal of Mineral Processing*. 2016;156:62-68.
  26. Gunko V.M., Turov V.V., Bogatyrov V.M., Zarko V.I., Chuiko A.A. Unusual properties of water at hydrophilic/hydrophobic interfaces. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2005;118(1-3):125-172.
  27. Smith A.M., Borkovec M., Trefalt G. Forces between solid surfaces in aqueous electrolyte solutions. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2020;275:Article ID 102078.
  28. Evdokimov S.I., Golikov N.S., Pryalukhin A.F., Kondratiev V.V., Mishedchenko A., Kuzina A.V., Bryukhanova N.N., Karlina A.I. Studying flotation of gold microdispersions with carrier minerals and pulp aeration with a steam-air mixture. *Minerals*. 2024;14(1):Article ID 108.
  29. Evdokimov S.I., Golikov N.S., Zadkov D.A., Voitovich E.V., Kondratiev V.V., Petrovskiy A.A., Konnyukhov V.Y., Gladkikh V.A. Studying the flotation of gold-bearing ores using carrier minerals. *Minerals*. 2024;14(1):Article ID 88.

30. Evdokimov S.I., Guseva E.A., Konstantinova M.V., Vaitekunene E.L., Filyushina E.V. Mechanism of coagulation under flotation of gold microdispersions with carrier minerals. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskyy zhurnal)* [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. 2023;(11-1):190-206. (In Russ.)
31. Sabanova M.N., Leontieva E.V., Orekhova N.N., Gorlova O.E. Search studies of the collector to increase gold recovery in the copper flotation cycle of flotation of cuprous and porphyry ores. *Izvestiya Tulkogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle* [Proceedings of Tula State University. Earth Sciences]. 2020;(4):239-249. (In Russ.)
32. Gorlova O.E., Shadrinova I.V., Zhilina V.A., Cherkushina T.V. Increasing the completeness of gold recovery from stale waste of processing gold-containing ore. *Izvestiya Tulkogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle* [Proceedings of Tula State University. Earth Sciences]. 2020;(1):193-210. (In Russ.) DOI: 10.46689/2218-5194-2020-1-1-193-210
33. Sabanova M.N., Orekhova N.N., Gorlova O.E., Glagoleva I.V. Influence of reagents based on dialkyl dithiophosphates on the flotation of copper from pyrite-containing slags. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tsvetnaya metallurgiya* [News of Higher Educational Institutions. Non-Ferrous Metallurgy]. 2018;(4):4-14. (In Russ.) DOI: 10.17073/0021-3438-2018-4-4-14
34. Zavarukhina E.A., Orekhova N.N. Influence of an additional collector on the selectivity of the flotation separation of copper and zinc sulfides. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskyy zhurnal)* [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. 2017;(3):305-311. (In Russ.)
35. Chanturiya V.A., Shadrinova I.V., Gorlova O.E. Innovative processes of deep and environmentally safe processing of man-caused raw materials under the conditions of new economic challenges. *Ustoychivoe razvitiye gornyykh territoriy* [Sustainable Development of Mountain Territories]. 2021;13(2(48)):224-237. (In Russ.) DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-2-224-237

Поступила 25.04.2024; принята к публикации 06.06.2024; опубликована 30.09.2024  
Submitted 25/04/2024; revised 06/06/2024; published 30/09/2024

**Евдокимов Сергей Иванович** – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, Россия. Email: eva-ser@mail.ru. ORCID 0000-0002-2960-4786

**Герасименко Татьяна Евгеньевна** – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, Россия. Email: gerasimenko\_74@mail.ru. ORCID 0000-0001-7048-4379

**Горлова Ольга Евгеньевна** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия; Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова РАН, Москва, Россия. Email: gorlova\_o\_e@mail.ru.

**Орехова Наталья Николаевна** – доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова РАН, Москва, Россия. Email: n\_orehova@mail.ru.

**Sergey I. Evdokimov** – PhD (Eng.), Lead Researcher, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia. Email: eva-ser@mail.ru. ORCID 0000-0002-2960-4786

**Tatiana E. Gerasimenko** – PhD (Eng.), Lead Researcher, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia. Email: gerasimenko\_74@mail.ru. ORCID 0000-0001-7048-4379

**Olga E. Gorlova** – DrSc (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Geology, Surveying and Mineral Processing, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia; Melnikov Institute of Comprehensive Subsoil Development, the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. Email: gorlova\_o\_e@mail.ru

**Natalia N. Orekhova** – DrSc (Eng.), Associate Professor, Lead Researcher, Melnikov Institute of Comprehensive Subsoil Development, the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. Email: n\_orehova@mail.ru

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДЕФЕКТОВ ГАЗОВОГО ХАРАКТЕРА  
В ДЕТАЛЯХ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА С ШАРОВИДНЫМ  
ГРАФИТОМ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ ЛИТЬЯ  
ПО ГАЗИФИЦИРУЕМЫМ МОДЕЛЯМ**Юров В.В.<sup>1</sup>, Цыганов И.А.<sup>1</sup>, Припадчева Н.А.<sup>2</sup><sup>1</sup> Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия<sup>2</sup> ООО «ЧугунСпецСтрой», Липецк, Россия

**Аннотация.** Актуальной задачей оптимизации технологии литья по газифицируемым моделям является снижение дефектности отливок. Стремление уменьшить количество дефектов обусловлено повышением технико-экономических показателей производства и всё более серьёзными требованиями потребителей к качеству продукции. Особое внимание уделяется ответственным деталям, от которых требуется безотказность работы. Из-за наличия дефектов в фасонных деталях из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом снижается прочность, повышается вероятность возникновения прорывов и аварийных ситуаций. Наиболее опасными при эксплуатации деталей трубопроводов являются несплошности в теле отливки. Целью данной работы является изучение особенностей морфологического строения и химического состава образовавшихся продуктов реакций на поверхности экзогенных дефектов. Для этого в работе использовались методы сканирующей электронной микроскопии с возможностью определения микрорентгеноспектрального анализа. Изучение химического состава поверхности дефектов позволило соотнести элементы на поверхности газовых пор, трещин и раковин с элементами, содержащимися в литейных материалах: модификаторе, противопригарной краске и формовочной смеси. Полученные результаты микрорентгеноспектрального анализа свидетельствуют об образовании на поверхности дефектов продуктов и пленок сложного состава с высоким содержанием углерода и кислорода, что может свидетельствовать о комплексных механизмах формирования газовых дефектов. Основываясь на общепринятых аспектах теории литейных процессов и полученных результатах микрорентгеноспектрального анализа, нами предложены возможные механизмы и причины образования дефектов. Результаты работы позволят инженерам отдела технического контроля эффективно идентифицировать дефекты, а инженерам-технологам иметь представление об источниках их образования, что, в свою очередь, позволит оптимизировать технологию производства отливок из чугуна с шаровидным графитом.

**Ключевые слова:** газовые дефекты, высокопрочный чугун, литье по газифицируемым моделям, сканирующая электронная микроскопия, микрорентгеноспектральный анализ

© Юров В.В., Цыганов И.А., Припадчева Н.А., 2024

**Для цитирования**

Юров В.В., Цыганов И.А., Припадчева Н.А. Идентификация дефектов газового характера в деталях из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, изготовленных по технологии литья по газифицируемым моделям // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №3. С. 43-51. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-43-51>



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

# IDENTIFICATION OF DEFECTS OF GAS NATURE IN PARTS MADE OF HIGH-STRENGTH CAST IRON WITH SPHERICAL GRAPHITE MANUFACTURED ACCORDING TO THE LOST FOAM CASTING TECHNOLOGY

Yurov V.V.<sup>1</sup>, Tsyganov I.A.<sup>1</sup>, Pripadcheva N.A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

<sup>2</sup> LLC ChugunSpetsStroy, Lipetsk, Russia

**Abstract.** A currently relevant task of optimizing the lost foam casting technology is to reduce defects of castings. This is due to an increase in technical and economic indicators of production and increasingly strong consumer requirements for the product quality. Special attention is paid to critical duty parts with the required long-term trouble-free operation. Defects in formed parts made of high-strength cast iron with spherical graphite reduce strength and increase the likelihood of breakthroughs and emergencies. The most dangerous defects in operation of pipeline parts are discontinuities in the casting body. This research is aimed at studying the features of the morphological structure and a chemical composition of the formed reaction products on the surface of exogenous defects. We used scanning electron microscopy methods with the possibility of determining an X-ray microanalysis. Studies on a chemical composition of the defect surface contributed to correlating the elements on the surface of gas pores, cracks and cavities with the elements contained in casting materials: a modifier, non-stick paint and the molding mixture. The X-ray microanalysis showed that products and films were formed on the surface of defects. They are characterized by a complex chemical composition with a high content of carbon and oxygen. This may indicate complex mechanisms of formation of gas defects. Based on the generally accepted aspects of the theory of foundry processes and the obtained X-ray microanalysis results, we have proposed possible mechanisms and causes of defect formation. The results described in this paper are useful for engineers of the technical control department to identify defects efficiently and process engineers to establish the causes and sources of their formation. This will optimize the production technology of castings made of cast iron with spherical graphite.

**Keywords:** gas defects, high-strength cast iron, lost foam casting, scanning electron microscopy, micro X-ray spectral analysis

## For citation

Yurov V.V., Tsyganov I.A., Pripadcheva N.A. Identification of Defects of Gas Nature in Parts Made of High-Strength Cast Iron with Spherical Graphite Manufactured According to the Lost Foam Casting Technology. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 3, pp. 43-51. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-43-51>

## Введение

Высокопрочный чугун с шаровидным графитом (ВЧШГ) обладает высокой прочностью и повышенной устойчивостью к коррозии, вследствие чего является востребованным конструкционным материалом на рынке металлопродукции [1, 2]. Из него изготавливают трубы, фасонные части трубопроводов, ответственные детали машин. Большое влияние на качество изготавливаемой продукции оказывают дефекты литья. Они могут приводить к снижению прочности, изменению размеров и формы детали, нарушению герметичности, что недопустимо для фасонных и конструктивных деталей, применяемых при эксплуатации [3-5].

Поэтому актуальной задачей литейного производства является снижение количества дефектов за счет оптимизации технологии производства.

Классификация дефектов согласно ГОСТ 19200-80 «Отливки из чугуна и стали. Термины и определения дефектов» включает:

- несоответствие по геометрии;
- дефекты поверхности;
- несплошности в теле отливки;
- включения;
- несоответствие по структуре.

Перспективной технологией для получения сложных тонкостенных отливок из ВЧШГ с внутренними каналами является метод литья по газифицируемым моделям (ЛГМ) [6]. Преимуществами данной технологии выступают:

- высокая точность отливок любой сложности;
- экологичность производства;
- высокое сходство деталей при серийном производстве [6].

Особенностью технологии является высокое газовыделение из-за термодеструкции пенополистирола. Согласно [6], при термодеструкции пенополистирола образуются парообразные продукты, представленные рядом углеводородов ( $C_6H_6$ ,  $C_7H_8$ ,  $C_8H_8$ ), газообразные –  $H_2$ ,  $CO$ ,  $N_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_2H_2$ ,  $C_3H_6$ ,

$C_3H_8$ ,  $i-C_3H_{12}$  и твердые – в виде сажистых углеродсодержащих соединений.

Продукты термодеструкции способны взаимодействовать с материалами формовочной смеси и противопожарной краски [6, 7], из-за чего состав и свойства последних могут оказывать влияние на качество получаемых отливок из ВЧШГ [8].

Наиболее опасными для деталей трубопроводов выступают несплошности в теле отливки, представленные дефектами усадочного и/или газового характера. Если первые были изучены в работах [9, 10], где описываются основные причины, механизмы образования и способы устранения, то со вторыми вопрос обстоит сложнее и требует детального исследования с установлением механизмов и причин их образования.

При ЛГМ из-за повышенного газовыделения и несоблюдения технологии производства в деталях могут наблюдаться обвалы песчаной формы [11], повышенное количество дефектов газового характера с повышенным содержанием углерода [12, 13]. Такие дефекты могут иметь маленькие размеры, из-за чего сложно идентифицируются при обычном визуальном осмотре, однако они снижают прочность, нарушают сплошность и герметичность отливок.

На данный момент характерными признаками для выявления дефектов экзогенного газового характера выступают их форма, цвет и расположение. Однако такой подход, во-первых, не всегда обеспечивает высокую точность анализа, а во-вторых, не подходит для определения сложных или специфичных дефектов. Помочь в установлении вида дефекта и механизма его образования может информация о химическом составе поверхности.

Стоит заметить, что ГОСТ 19200-80 не учитывает специфику различных технологий литья, а также не содержит сведений о причинах появления и мерах предупреждения образования дефектов.

Целью данной работы является установление возможных причин образования специфичных дефектов в деталях из ВЧШГ, полученных по технологии

ЛГМ, в результате исследования их морфологических особенностей и химического состава поверхности.

### Материалы и методы исследования

Для проведения исследования были отлиты детали из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом по технологии ЛГМ. Для модифицирования использовался комплексный модификатор, содержащий Mg, Ca и редкоземельные металлы La, Ce. Температура разливки находилась в диапазоне 1450-1500°C. Химический состав представлен в **табл. 1**.

Таблица 1. Химический состав высокопрочного чугуна, мас. %

Table 1. Chemical composition of high-strength cast iron, wt. %

C	Si	Mn	P	S	Mg
3,4-3,7	2,4-2,8	0,3-0,6	≤0,03	≤0,01	0,03-0,06

Образцы для исследований были механически вырезаны из дефектных участков отливок.

Исследования проводились на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA 3 SBH при ускоряющем напряжении 15-20 кВ в режимах обратноотраженных (BSE-детектор) и вторичных электронов (SE-детектор). Химический состав поверхности дефекта определялся методом микроанализа с использованием энергодисперсионной приставки Oxford Instruments, обработка полученных результатов проводилась программным комплексом Inca.

### Полученные результаты и их обсуждение

На **рис. 1** представлена крупная газоусадочная раковина неправильной вытянутой формы. Её поверхность представлена тонкодисперсными частицами, микроанализ (МРСА) которых представлен в **табл. 2**.

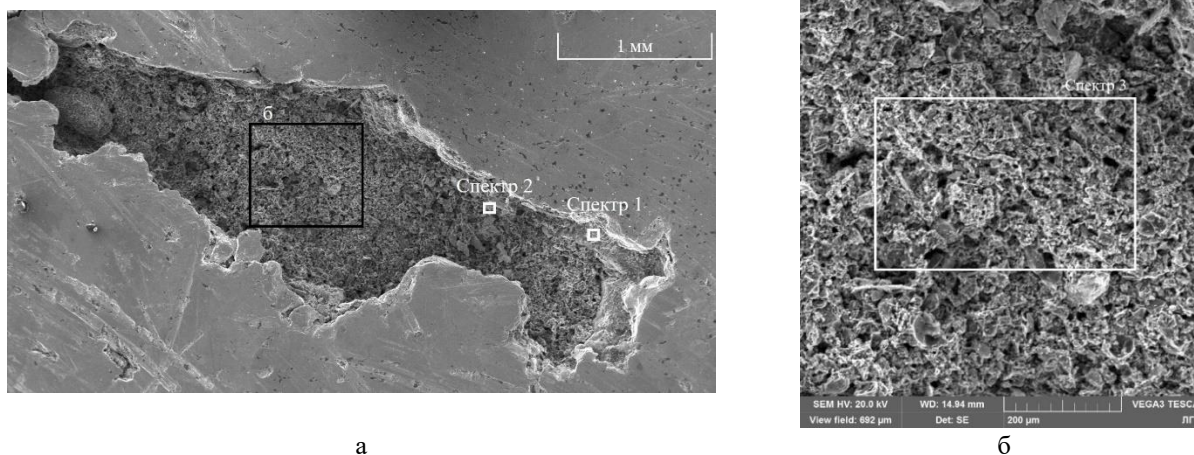


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение газоусадочного дефекта: а – общий вид,  $\times 75$ ; б –  $\times 400$

Fig. 1. Electron microscopy image of the gas and shrinkage defect: a is a general view,  $\times 75$ , b is  $\times 400$

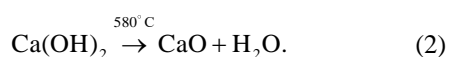
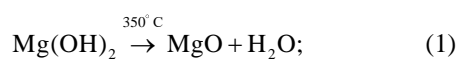
Таблица 2. Результаты микрорентгеноспектрального анализа поверхности дефекта на рис. 1, мас. %  
Table 2. The X-ray microanalysis of the surface of the defect shown in Figure 1, wt. %

Спектр	C	O	Na	Mg	Al	Si	Mn	S	K	Ca	Ti	Ce	Fe
1	35,41	16,81	0,15	4,53	0,28	2,43	–	0,20	–	0,29	0,15	0,46	39,30
2	22,68	8,44	–	–	0,28	3,17	0,32	–	–	–	–	–	65,11
3	34,56	40,82	0,5	0,26	1,91	17,26	–	–	0,62	1,20	–	–	2,60

Повышенное содержание Mg, Ca, Ti, Ce в спектре 1 свидетельствует о выходе элементов модификатора на границу кристаллов, что указывает на протекание усадочных процессов при дефектообразовании.

Присутствие Na и K на поверхности дефекта может свидетельствовать о миграции данных элементов из противоположной краски или формовочной смеси [14], где они содержатся в виде оксидов, в расплав чугуна при заливке. Однако Na<sub>2</sub>O и K<sub>2</sub>O достаточно стабильны и переходят в газообразную форму при температурах, превышающих температуру разлива чугуна. Но при повышенной влажности могут образоваться соответствующие гидроксиды KOH, NaOH, температуры кипения которых равны 1325 и 1403°C соответственно, что, в свою очередь, меньше температуры заливаемого чугуна в данном эксперименте.

В противоположной краске также содержатся оксиды Mg и Ca, температура кипения которых равна 3600 и 2850°C соответственно. Их миграция в область дефекта совместно с Na и K также возможна только из «сырой» противоположной краски, где из-за повышенной влажности MgO и CaO переходят в соответствующие гидроксиды, они уже менее стабильны. Так, например, температура разложения Mg(OH)<sub>2</sub> равна 350°C, а Ca(OH)<sub>2</sub> – 580°C, что существенно меньше температуры заливаемого чугуна:

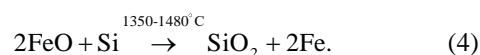
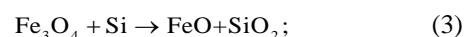


Выделившиеся газообразные продукты H<sub>2</sub>O, KOH, NaOH при достаточной газопроницаемости формовочных материалов успешно отводятся от формы с помощью вакуумной системы. Однако при повышении газотворности процесс удаления затрудняется, вследствие чего газы будут способны проникать в форму и реагировать с расплавом.

Высокое содержание кислорода на поверхности дефекта может быть объяснено взаимодействием паров воды и жидкого расплава с выделением газообразного водорода и оксидов железа.

Высокое содержание Si на поверхности дефекта в спектре 3 свидетельствует о раскислении оксидов железа по формулам (3) и (4) с образованием диоксида крем-

ния (SiO<sub>2</sub>). Стоит заметить, что протекание реакций возможно в температурном интервале 1350-1480°C:



Повышенное содержание углерода указывает на участие в процессе дефектообразования углеродсодержащих продуктов деструкции пенополистирола, которые способны:

- осаждаться на поверхности дефекта;
- взаимодействовать с газами и/или расплавами, попавшими в чугун из формовочных материалов, и образовывать карбонаты.

На рис. 2, а представлен дефект сферической формы. Согласно результатам МРСА, представленным в табл. 3, на поверхности дефекта наблюдается повышенное содержание углерода и кислорода.

Формирование на поверхности слоя углеродсодержащих материалов может свидетельствовать об участии в процессе дефектообразования продуктов деструкции пенополистирола, в частности СО и сажки, которые не были полностью удалены из формы при заливке расплава чугуна.

Повышенное содержание кислорода может указывать сразу на несколько причин:

- попадание в расплав шлака при заливке;
- введение в расплав влажного модификатора;
- образование оксидов и карбонатов из-за избыточного давления СО, выделившегося при термодеструкции пенополистирола.

На рис. 2, б представлена шлакогазовая раковина, химический состав поверхности которой представлен в табл. 4.

Высокое содержание кислорода и редкоземельных металлов указывает на образование шлаков в процессе модифицирования. Их распределение в дефекте характерно для затвердевшего комплексного оксидного расплава. Другой особенностью дефекта, представленного на рис. 2, б, является образование между шлаком и основным металлом промежуточного слоя с повышенным содержанием углерода, образование которого могло быть следствием захвата расплавом продуктов термодеструкции пенополистирола.

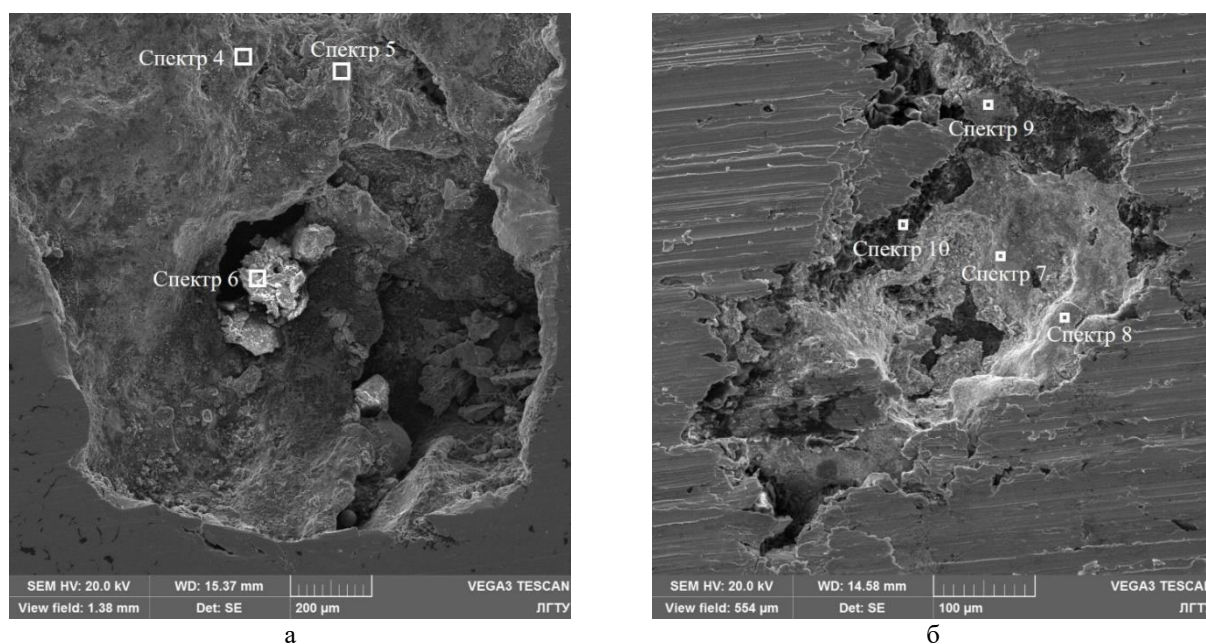


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение дефектов, идентифицированных как «шлакогазовая раковина»: а – дефект 1,  $\times 200$ ; б – дефект 2,  $\times 500$

Fig. 2. Electron microscopy image of defects identified as a “slag gas cavity”: a is defect 1,  $\times 200$ , б is defect 2,  $\times 500$

Таблица 3. Результаты микрорентгеноспектрального анализа поверхности дефекта на рис. 2, а, мас. %

Table 3. The X-ray microanalysis of the surface of the defect shown in Figure 2a, wt. %

Спектр	C	O	Mg	Al	Si	Mn	S	Ca	Cr	Fe	La	Ce
4	41,35	25,85	–	0,67	0,73	–	0,17	0,68	–	30,56	–	–
5	6,49	2,75	–	–	2,91	–	–	–	–	87,85	–	–
6	25,38	16,12	0,1	0,16	1,49	0,3	–	–	–	56,45	–	–

Таблица 4. Результаты микрорентгеноспектрального анализа поверхности дефекта на рис. 2, б, мас. %

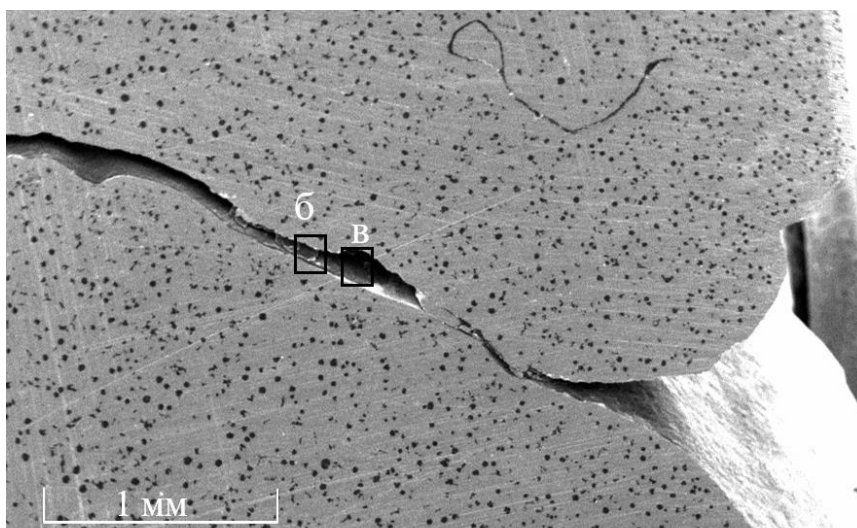
Table 4. The X-ray microanalysis of the surface of the defect shown in Figure 2 б, wt. %

Спектр	C	O	Mg	Al	Si	Mn	S	Ca	Cr	Fe	La	Ce
7	12,00	26,53	2,88	0,63	2,63	–	4,07	0,76	–	26,16	8,83	15,25
8	11,82	3,01	0,41	0,4	0,38	–	0,77	0,35	–	38,59	10,98	22,40
9	12,17	30,30	6,06	2,97	4,40	–	1,78	1,12	1,20	–	7,82	16,02
10	59,40	15,63	–	0,13	0,72	–	–	–	–	24,12	–	–

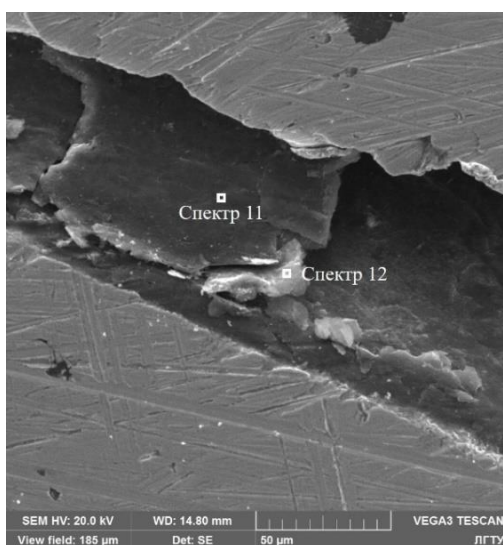
На рис. 3 представлен дефект, идентифицированный как спай. Причиной формирования данного дефекта является не полностью слившиеся потоки чрезмерно охлажденной, окисленной поверхности металла. Однако при изготовлении деталей по методу литья по газифицируемым моделям процесс дефектообразования может быть интенсифицирован за счет захвата расплавом и дальнейшего пиролиза продуктов термодеструкции пенополистирола. Что сначала приводит к осаждению пироуглерода на поверхность металла, а затем, при охлаждении, способствует накоплению на поверхности пироуглерода атомарно-

го углерода. Это подтверждается результатами МРСА, представленными в табл. 5.

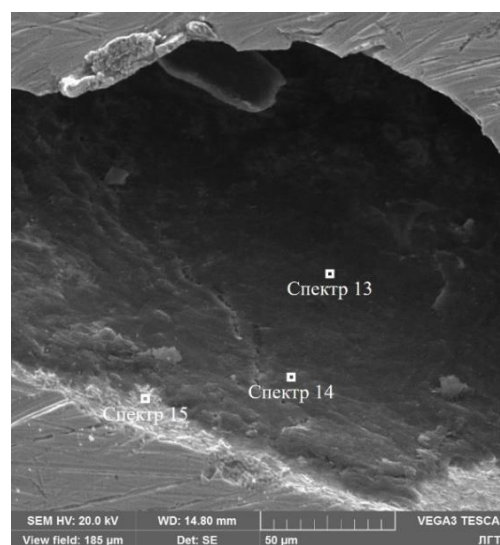
На рис. 4 представлен комплексный дефект, состоящий из раковины диаметром 200 мкм и микротрещин, поверхность которых, согласно результатам МРСА в табл. 6, покрыта углеродсодержащими продуктами. Повышенное содержание углерода на поверхности дефекта и присутствие микротрещин свидетельствует, как уже ранее говорилось, об осаждении углеродсодержащих продуктов на поверхность дефекта из-за захвата продуктов термодеструкции пенополистирола и их дальнейшего пиролиза.



а



б



в

Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение дефекта «спай»: а – общий вид,  $\times 75$ ; б – поверхность спая  $\times 1500$ ; в – поверхность спая,  $\times 1500$

Fig. 3. Electron microscopy image of the cold shut defect: a is a general view,  $\times 75$ , б is the cold shut surface,  $\times 1500$ , в is the cold shut surface,  $\times 1500$

Таблица 5. Результаты микрорентгеноспектрального анализа поверхности дефекта на рис. 3, мас. %  
Table 5. The X-ray microanalysis of the surface of the defect shown in Figure 3, wt. %

Спектр	C	O	Si	Fe
11	84,99	5,85	–	9,16
12	94,49	3,15	0,11	2,26
13	73,8	12,99	–	13,22
14	78,84	10,37	–	10,79

Однако первопричинами образования дефектов могли выступить:

– усадочные процессы, из-за которых образовались микротрещины (рис. 4, а);

– окисление модификатора, из-за чего образовалась газопластовая раковина (рис. 4, б).

На основе проведенного исследования в табл. 7 приведены предположительные причины возникновения рассмотренных дефектов.



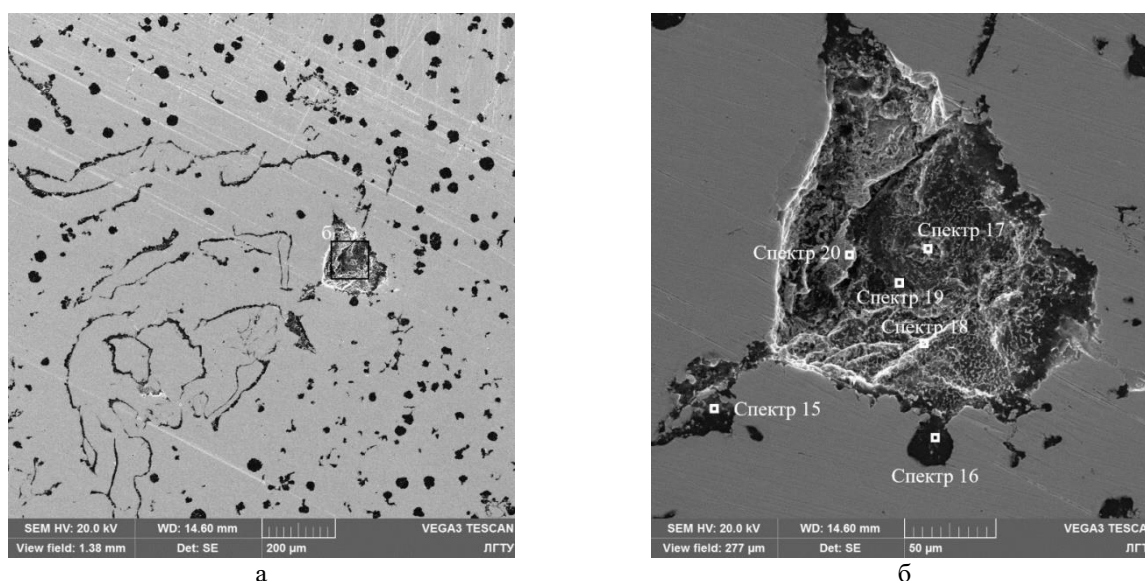


Рис. 4. Электронно-микроскопические изображения дефектов:

а – микротрещины,  $\times 200$ ; б – шлакогазовая раковина,  $\times 1000$ Fig. 4. Electron microscopy images of defects: a is microcracks,  $\times 200$ , б is a slag gas cavity,  $\times 1000$ 

Таблица 6. Результаты микрорентгеноспектрального анализа поверхности дефекта на рис. 4, б, мас. %

Table 6. The X-ray microanalysis of the surface of the defect shown in Figure 4б, wt. %

Спектр	C	O	Mg	Al	Si	Ca	La	Ce	Fe
15	75,52	–	–	–	0,60	–	–	–	23,87
16	94,82	2,47	–	–	–	–	–	–	2,61
17	24,39	39,25	17,05	1,78	9,83	0,32	1,86	3,72	1,80
18	51,73	3,06	0,64	–	0,23	–	–	–	44,34
19	37,76	–	0,35	–	1,29	–	–	–	60,61
20	97,33	1,42	–	–	–	–	–	–	1,25

Таблица 7. Причины возникновения дефектов

Table 7. Causes of defects

Дефект	Причины возникновения
Газоусадочная раковина	<ul style="list-style-type: none"> <li>– выделение газа из формовочной смеси и/или противопригарной краски в незатвердевшую отливку;</li> <li>– низкая газопроницаемость и высокая влажность материалов формовочной смеси и противопригарной краски;</li> <li>– высокая температура заливки расплава в форму</li> </ul>
Шлакогазовая раковина	<ul style="list-style-type: none"> <li>– восстановление окисленного металла с образованием пузырей и захватом шлаковых частиц;</li> <li>– высокое содержание газов в исходном расплаве до модифицирования;</li> <li>– введение в расплав влажного модификатора;</li> <li>– превышено содержание РЗМ в модификаторе;</li> <li>– превышена температура модифицирования</li> </ul>
Дефекты с высоким содержанием углерода на поверхности: – спай – микротрещины – шлакогазовая раковина	<ul style="list-style-type: none"> <li>– избыточное давление газообразных продуктов термодеструкции пенополистирола из-за повышенной газотворности материалов формовочной смеси и/или противопригарной краски;</li> <li>– ухудшение жидкотекучести расплава;</li> <li>– высокая температура расплава при заливке, которая приводит к пиролизу углеводородов (продуктов термодеструкции ППС);</li> <li>– прерывистое течение расплава при заливке;</li> <li>– медленная заливка, слабый напор металла</li> </ul>

### Заключение

Методами сканирующей электронной микроскопии с применением МРСА проведена идентификация дефектов типа «несплошности» в чугунных отливках, изготовленных методом ЛГМ. Показано, что МРСА позволяет уточнить химический состав поверхности дефекта.

По результатам исследования установлено, что при литье по газифицируемым моделям формирование дефекта усложняется выделением продуктов термодеструкции пенополистирола, из-за чего их размеры увеличиваются, а на поверхности образуются углерод- и кислородсодержащие продукты реакции.

Установлено, что образование газовых дефектов в чугунных отливках, изготовленных по технологии ЛГМ, имеет сложный характер и, как правило, осложнено сразу несколькими сопутствующими причинами, и в зависимости от механизма дефектообразования изменяется химический состав поверхности дефекта.

Так, например совместное присутствие Na, K, Mg, Ca свидетельствует об участии в образовании дефекта материалов формовочной смеси или противопригарной краски, Mg, Ca, PЗМ – модификатора. Высокое содержание С и О указывает на неполное удаление или захват расплавом продуктов термодеструкции пенополистирола.

### Список источников

1. Строительство трубопроводов из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом / М.А. Лебедева, Э.Ф. Идиятуллина, М.С. Чухлатый, А.В. Набоков // Инженерный вестник Дона. 2020. №1(61). С. 31.
2. Костин С.И., Минченков А.В., Гумеров К.М. Трубы из высокопрочного чугуна в нефтегазовой отрасли // Территория Нефтегаз. 2012. №12. С. 28-31.
3. Жуков А.А., Маццарелли Д., Беляков А.А. Производство отливок из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом / под ред. А.И. Белякова. М.: Машиностроение, 2010. 711 с.
4. Совершенствование литейной технологии получения корпусных отливок из ВЧШГ для энергомашиностроения в условиях импортозамещения / М.Ю. Щеголев, А.А. Бречко, Ф.Н. Дмитриев, Д.В. Беляев // Литейщик России. 2023. №10. С. 22-29.
5. Воронин Ю.Ф., Камаев В.А. Атлас литейных дефектов. Черные сплавы. М.: Машиностроение – 1, 2005. 327 с.
6. Шуляк В. Литье по газифицируемым моделям. СПб.: НПО «Профессионал», 2007. 408 с.
7. Ovcharenko P.G., Kuz'minykh E.V., Lad'yanov V.I. Interaction of a Nonstick Corundum Coating with Iron-Carbon Melts under Lost-Foam Casting Conditions. Russian Metallurgy (Metally). 2020, vol. 2020, no. 2, pp. 115-120. DOI: 10.1134/S003602952002010X
8. Влияние материала модели и состава краски при ЛГМ на качество отливки / С.К. Баринаова, С.С. Квон, В.Ю. Куликов и др. // Литейное производство. 2023. №5. С. 32-34.
9. Takemoto Y., Mizumoto M. & Kinno K. Internal Porosity Defects in Ductile Cast Irons. Inter Metalcast. 2021, vol. 15, pp. 916-929. DOI: 10.1007/S40962-020-00527-X
10. Sertucha J., Lacaze J. Casting Defects in Sand-Mold Cast Irons – An Illustrated Review with Emphasis on Spheroidal Graphite Cast Irons // Metals 2022, vol. 12, no. 3, 504. DOI: 10.3390/MET12030504
11. Sun W., Littleton H.E., & Bates C.E. Formation mechanism of gas cavity defects in lost foam iron castings. International Journal of Cast Metals Research. 2003, vol. 16, iss. 6, pp. 549-553. DOI: 10.1080/13640461.2003.11819634
12. Jezierski J., Jureczko M., Dojka R. The Impact of Process Factors on Creating Defects, Mainly Lustrous Carbon, during the Production of Ductile Iron Using the Lost-Foam Casting (LFC) Method // Metals. 2020, vol. 10, no. 8, 1022. DOI: 10.3390/MET10081022
13. Joo Mae Jeon, Soo Jo Lee, Kyeong Hwan Choe, Jeung-Soo Huh. Gas Pressure Effect on Sand Collapse in Kinetic Zone of Lost-Foam Casting // Advances in Materials Science and Engineering, 2020, vol. 2020, 5861017, 9 p. DOI: 10.1155/2020/5861017
14. Исследование деструкции кварцевого песка после литья по газифицируемым моделям / В.В. Юров, И.А. Цыганов, В.С. Кузнецов, Н.А. Припадчева // Литейное производство. 2024. №3. С. 23-27.

### References

1. Lebedeva M.A., Idiyatullina E.F., Chukhlatay M.S., Nabokov A.V. Construction of pipelines made of high-strength cast iron with spherical graphite. *Inzhenerny vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don]. 2020;(1(61)):31. (In Russ.)
2. Kostin S.I., Minchenkov A.V., Gumerov K.M. High-strength cast iron pipes in the oil and gas industry. *Territoriya Neftegaz* [The Area of Oil and Gas]. 2012;(12):28-31. (In Russ.)
3. Zhukov A.A., Mazzarelli D., Belyakov A.A. *Proizvodstvo otlivok iz vysokoprochnogo chuguna s sharovidnym grafitom* [Production of castings from high-strength cast iron with spherical graphite]. Belyakov A.I. (Ed.). Moscow: Mashinostroenie, 2010, 711 p. (In Russ.)
4. Shchegolev M.Yu., Brechko A.A., Dmitriev F.N., Belyaev D.V. Improvement of the foundry technology for producing hull castings from high-strength cast iron with spherical graphite for power engineering in the context of import substitution. *Liteyshchik Rossii* [Foundry of Russia]. 2023;(10):22-29. (In Russ.)
5. Voronin Yu.F., Kamaev V.A. *Atlas liteynykh defektov. Chernye splavy* [Atlas of foundry defects. Ferrous alloys]. Moscow: Mashinostroenie – 1, 2005, 327 p. (In Russ.)

6. Shulyak V. *Lite po gazifitsiruemyim modelyam* [Lost foam casting]. Saint Petersburg: NPO Professional, 2007, 408 p. (In Russ.)
7. Ovcharenko P.G., Kuzminykh E.V., Ladyanov V.I. Interaction of a nonstick corundum coating with iron-carbon melts under lost-foam casting conditions. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2020;2020:115-120. DOI:10.1134/S003602952002010X
8. Barinova S.K., Kwon S.S., Kulikov V.Yu. et al. Influence of the model material and the paint composition in LFC on the quality of the casting. *Liteynoe proizvodstvo [Foundry]*. 2023;(5):32-34. (In Russ.)
9. Takemoto Y., Mizumoto M., Kinno K. Internal porosity defects in ductile cast irons. *Inter Metalcast*. 2021;15:916-929. DOI: 10.1007/S40962-020-00527-X
10. Sertucha J., Lacaze J. Casting defects in sand-mold cast irons – An illustrated review with emphasis on spheroidal graphite cast irons. *Metals*. 2022;12(3): Article ID 504. DOI:10.3390/met12030504
11. Sun W., Littleton H.E., Bates C.E. Formation mechanism of gas cavity defects in lost foam iron castings. *International Journal of Cast Metals Research*. 2003;16(6):549-553. DOI: 10.1080/13640461.2003.11819634
12. Jezierski J., Jureczko M., Dojka R. The impact of process factors on creating defects, mainly lustrous carbon, during the production of ductile iron using the lost-foam casting (LFC) method. *Metals*. 2020;10(8):Article ID 1022. DOI:10.3390/met10081022
13. Joo Mae Jeon, Soo Jo Lee, Kyeong Hwan Choe, Jeung-Soo Huh. Gas pressure effect on sand collapse in kinetic zone of lost-foam casting. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2020;2020(1):Article ID 5861017. DOI:10.1155/2020/5861017
14. Yurov V.V., Tsyganov I.A., Kuznetsov V.S., Pripadcheva N.A. Study on the destruction of quartz sand after lost foam casting. *Liteynoe proizvodstvo [Foundry]*. 2024;(3):23-27. (In Russ.)

Поступила 17.04.2024; принята к публикации 21.05.2024; опубликована 30.09.2024  
Submitted 17/04/2024; revised 21/05/2024; published 30/09/2024

**Юров Владислав Викторович** – аспирант,  
Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия.  
Email: vladyuroff@yandex.ru. ORCID 0009-0006-7290-8749

**Цыганов Игорь Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент,  
Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия.  
Email: zyganov.igor@gmail.com. ORCID 0000-0001-6446-2368

**Припадчева Наталья Алексеевна** – начальник научно-производственной лаборатории,  
ООО «ЧугунСпецСтрой», Липецк, Россия.  
Email: sciencchss@mail.ru.

**Vladislav V. Yurov** – postgraduate student,  
Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia.  
Email: vladyuroff@yandex.ru. ORCID 0009-0006-7290-8749

**Igor A. Tsyganov** – PhD (Eng.), Associate Professor,  
Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia.  
Email: zyganov.igor@gmail.com. ORCID 0000-0001-6446-2368

**Natalya A. Pripadcheva** – Head of the Research and Development Laboratory,  
LLC ChugunSpetsStroy, Lipetsk, Russia.  
Email: sciencchss@mail.ru.

# МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

## METALLURGY OF FERROUS, NON-FERROUS AND RARE METALS

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

УДК 669:536.21

DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-3-52-59



### ФОРМИРОВАНИЕ ПОЛУНЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ ПРИ ВИБРОВОЗДЕЙСТВИИ

Уздиева Н.С., Ахтаев С.С.-С., Айсунгуров Н.Д.

Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова, Грозный, Россия

**Аннотация.** В данной статье авторами приведены результаты изучения процессов формирования структуры и свойств алюминиевых заготовок, отлитых под воздействием вибрации на установке полунепрерывного типа. В исследовании показано, что применение вибрации при формировании полунепрерывнолитых заготовок может заметно улучшить теплообмен в зонах принудительного охлаждения, что, в свою очередь, должно повлиять на качество металла в литой заготовке и повысить производительность процесса в целом. Было установлено, что под воздействием вибрации количество тепла, отводимого в кристаллизаторе, заметно повышается для обеих заготовок (из камфена и алюминиевого сплава). Это является важным прикладным фактором, так как в реальных условиях из-за недостаточного теплоотвода в кристаллизаторе отливаемые заготовки на выходе из него имеют небольшую толщину затвердевшей корки, что приводит к прорыву жидкого металла с вытекающими отсюда последствиями. При этом вибрация за счет силового воздействия на затвердевающий металл оказывает существенное влияние на формирование структуры и свойств отливаемых заготовок, которое заключается, во-первых, в провоцировании зарождения центров кристаллизации за счет кавитации и, во-вторых, в разрушении растущих кристаллов. Такое силовое воздействие виброимпульса, в частности, для алюминиевого сплава АД31 проявилось в том, что вибрация измельчает макро- и микроструктуру литого металла до 3 раз, а также повышает его прочностные характеристики до 20% при неизменной пластичности. Кроме этого, вибрация уменьшает зону транскристаллизации за счет разрушения столбчатых кристаллов и, соответственно, снижает структурную неоднородность и анизотропию свойств металла по сечению литой заготовки. Таким образом, исследование показывает преимущества применения вибрации при формировании полунепрерывнолитых заготовок и подтверждает ее значительный потенциал для улучшения качества получаемых заготовок и повышения производительности процесса непрерывного литья металлов. При этом наиболее оптимальной схемой приложения вибрации при непрерывной разливке металлов является одновременный подвод виброимпульса к кристаллизатору и отливаемой заготовке.

**Ключевые слова:** сплав, кристаллизация, структурообразование, свойства, теплообмен, литой металл, заготовка

© Уздиева Н.С., Ахтаев С.С.-С., Айсунгуров Н.Д., 2024

#### Для цитирования

Уздиева Н.С., Ахтаев С.С.-С., Айсунгуров Н.Д. Формирование полунепрерывнолитой заготовки при вибро-воздействии // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №3. С. 52-59. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-52-59>



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

## FORMATION OF SEMI-CONTINUOUSLY CAST BILLETS UNDER VIBRATION

Uzdieva N.S., Akhtaev S.S.-S., Aisungurov N.D.

Millionshchikov Grozny State Oil Technical University, Grozny, Russia

**Abstract.** The article presents the results of a study on the processes of forming the structure and properties of aluminum billets cast under vibration on a semi-continuous casting machine. The study shows that vibration used in the formation of semi-continuously cast billets significantly improve heat exchange in the forced cooling zones, which, in turn, should influence the quality of the metal in cast billets and increase performance of the process in general. It has been found that under vibration heat removed in the mold increases significantly for both billets (made of camphene and the aluminum alloy). This is an important applied factor since in real conditions due to insufficient heat removal in the mold the exit cast billets have small thickness of the solidified shell, leading to a breakthrough of liquid metal with the relevant consequences. At the same time, vibration due to the force action on solidifying metal has a significant effect on the formation of the structure and properties of cast billets: firstly, provoking the nucleation of crystallization centers due to cavitation, and, secondly, the destruction of growing crystals. This force impact of the vibration pulse, in particular for aluminum alloy AD31, refines the macro- and microstructure of cast metal up to 3 times, and also increases its strength characteristics up to 20% with unchanged plasticity. Besides, vibration reduces the transcrystallization zone due to the destruction of columnar crystals and, consequently, reduces structural heterogeneity and anisotropy of the metal properties along the cross-section of the cast billet. Thus, the study shows the advantages of using vibration in the formation of semi-continuously cast billets and proves its significant potential for improving the quality of the produced billets and increasing performance of the continuous casting process. The most optimal process flow chart for applying vibration in continuous casting is to supply a vibration pulse to the mold and the cast billet at the same time.

**Keywords:** alloy, crystallization, structure formation, properties, heat transfer, cast metal, billet

### For citation

Uzdieva N.S., Akhtaev S. S.-S., Aisungurov N.D. Formation of Semi-Continuously Cast Billets Under Vibration. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 3, pp. 52-59. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-52-59>

### Введение

В работах многих авторов изучалось влияние на качество литой заготовки такого важного показателя, как интенсивность отвода тепла, а следовательно, и скорости кристаллизации затвердевающего металла [1-10]. Известно, что скорость теплообмена, происходящего при затвердевании расплава, сказывается на скорости формирования зародышей и их дальнейшего роста, а эти параметры влияют на качественные свойства литой заготовки. Значительное воздействие на процессы кристаллизации и структурообразование металлов оказывают вибрационные импульсы за счет следующих эффектов [1-3, 5, 8]:

- улучшение кристаллической структуры литой заготовки, которое заключается в формировании более однородной и мелкозернистой структуры, что повышает механические свойства литого металла, такие как прочность, пластичность и ударная вязкость;

- равномерное распределение примесей, что снижает химическую неоднородность по сечению литой заготовки и вероятность образования горячих трещин;

- уменьшение усадочных раковин и пористости, в том числе за счет более полного удаления газовых пузырьков. Это улучшает его плотность и прочность;

- улучшение чистоты поверхности литой заготовки, что важно при дальнейшей его деформационной и механической обработке;

- повышение производительности литья металлов за счет интенсификации тепло- и массообменных процессов при этом;

- снижение внутренних напряжений, которые возникают в затвердевающем металле в результате неодновременности протекания фазовых превращений. Это может предотвратить возникновение трещин и повысить устойчивость к разрушению материала.

При этом следует отметить, что влияние вибрации на формирование структуры и свойств затвердевающего металлического сплава зависит от ряда факторов: типа и направления, амплитуды и частоты виброимпульса, типа металлического сплава и др. Поэтому при использовании вибрации в металлургических технологиях необходимо провести тщательный анализ характера и параметров вибрации в привязке к свойствам конкретного металлического сплава.

### Материалы и методы исследования

В данной работе авторы приводят результаты исследования влияния вибрации на формирование полунепрерывнолитых заготовок из камфена (физиче-

ское моделирование) и сплава АД31. Заготовки из алюминия отливались на установке ПНЛЗ при температуре 710°C, форма заготовки – круг радиусом 31,5 мм. Диапазон частоты вибрации изменяли от нуля до 150 Гц, амплитуда вибрации регулировалась от нуля до 2 мм. При этом в первом случае вибровоздействие определенной частоты и соответствующей амплитуды оказывалось только на кристаллизатор ПНЛЗ, во втором одновременно воздействовали вибрацией и на кристаллизатор, и на заготовку.

Для сравнительного анализа отливалась контрольная заготовка без вибровоздействия.

С целью определения плотности и механических свойств изучаемых сплавов использовались образцы, вырезанные из разных зон заготовок, их же использовали в ходе проведения металлографического и термического анализов.

Исследование микро- и макроструктуры проводилось на шлифах после их химического травления по стандартным методикам.

Для проведения термического анализа контрольный и опытный образцы размещались в специальной пробнице установки, в которой доводились до температуры перегрева 760°C. Затвердевание достигалось охлаждением в специальных условиях. Анализ полученных результатов выполнялся согласно методике [7] с применением программного продукта компании Thermex – «Анализатор сплавов», которая позволяет визуализировать кривые охлаждения по участкам анализируемого образца с учетом дифференциации теплоотдачи по структурам исследуемого сплава.

Испытания по определению прочности и пластичности опытных образцов проведены согласно ГОСТ 1497-84.

### Полученные результаты и их обсуждение

Затвердевание заготовки при непрерывном литье металлов происходит в результате теплоотвода в кристаллизаторе и зоне вторичного охлаждения, но решающую роль при этом играют теплообменные процессы в кристаллизаторе. При анализе процесса теплообмена, происходящего в кристаллизаторе, были использованы следующие допущения.

Количество тепла, вносимое расплавленным металлом в кристаллизатор, можно условно разбить на следующие составляющие: тепло, передаваемое теплоносителю (то есть охлаждающей воде); тепло, уходящее лучеиспусканием через свободную поверхность расплава металла; тепло, затрачиваемое на нагрев металлического корпуса кристаллизатора; тепло, отводимое от наружных стенок кристаллизатора, и теплоту, уносимую отливом заготовкой из кристаллизатора в зону вторичного охлаждения [1, 8].

Всеми незначительными составляющими тепловых потерь в кристаллизаторе (потери тепла на лучеиспускание, на прогрев кристаллизатора и через его наружные стенки) можно пренебречь, так как они на

порядок меньше, чем теплоотвод охлаждающей водой. Поэтому можно допустить, что количество теплоты, подводимое жидким металлом к кристаллизатору, равно сумме теплоты, отводимой охлаждающей водой и уходящее из него с заготовкой [2, 8, 9].

В нашей лабораторной установке полунепрерывного литья металлов охлаждение заготовки в ЗВО не осуществлялось и, соответственно, его качество полностью зависело от теплоотвода в кристаллизаторе. При передаче тепла к охлаждающей воде в кристаллизаторе на его пути встречается множество тепловых барьеров, таких как корка затвердевающей заготовки, газовый зазор и шлаковый слой между стенкой кристаллизатора и металлом. То есть суммарный теплоотвод в кристаллизаторе зависит от теплопроводности всех вышеперечисленных барьеров.

Учитывая невозможность оценки значений всех коэффициентов теплопроводностей этих тепловых барьеров, при расчетах в данных условиях, по нашему мнению, можно принять количество тепла, передаваемое кристаллизатору, равным количеству тепла, отведенному охлаждающей водой, и определить его по известной физической формуле [11]:

$$Q_v = m_v C_v (T_k - T_n), \quad (1)$$

где  $m_v$  – масса воды в системе охлаждения, кг;  $C_v$  – теплоемкость воды, кДж/кг·°C;  $T_n$  и  $T_k$  – начальная и конечная температура воды в системе охлаждения, °C.

Для обеспечения стабильности процесса непрерывной разливки металлов необходимым условием тепловой работы кристаллизатора является снижение температуры поверхности отливаемой заготовки ниже температуры солидуса соответствующего сплава за счет передачи тепла охлаждающей воде. Физическое моделирование на органической среде камфена показало, что даже для такой низкотемпературной среды можно обеспечить это условие при соответствующей температуре теплоносителя (воды).

На **рис. 1** показано изменение температуры непрерывнолитой заготовки из камфена. Как видно из графика, именно в зоне кристаллизации происходит основное снижение температуры. При этом максимум интенсивности теплоотвода наблюдаем до точки А, то есть до образования газового зазора.

Для определения характера изменения плотности тепловых потоков от поверхности заготовки к стенке кристаллизатора были проведены эксперименты на камфене (метод физического моделирования) и на реальной заготовке из алюминиевого сплава [12, 13]. Результаты представлены на **рис. 2**.

Гистограмма на **рис. 2** четко демонстрирует для сопоставляемых вариантов исследований, что максимум плотности тепловых потоков отмечается на расстоянии 50 мм от поверхности заготовки для образца из камфена и 75 мм для образца из алюминия.

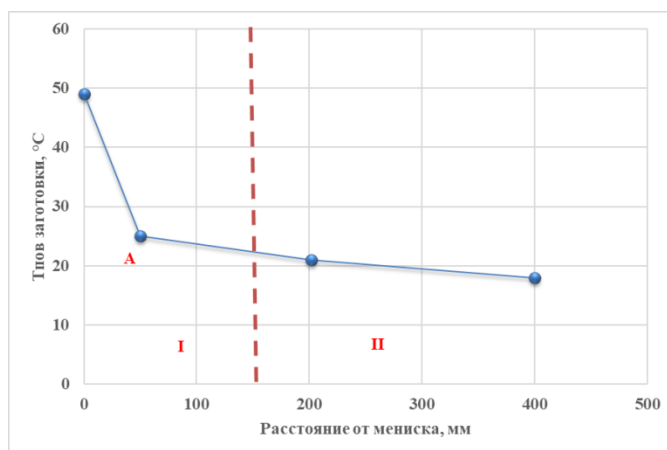


Рис. 1. Динамика изменения температуры поверхности непрерывнолитой модельной заготовки  
Fig. 1. Changes in the surface temperature of a continuously cast model billet



Рис. 2. Зависимость плотности теплового потока по высоте кристаллизатора  
Fig. 2. Dependence between heat flux density and mold height

Изменения плотности тепловых потоков по высоте кристаллизатора обусловлены формированием газового зазора между исследуемой заготовкой и стенкой кристаллизатора. Снижение интенсивности теплоотдачи от поверхности затвердевающей заготовки снижает отвод теплоты в различных зонах при продвижении непрерывной заготовки.

На кристаллизатор и зону вторичного охлаждения, то есть на участках, где применяется принудительное водяное охлаждение, приходится большая часть (не менее 3/4) отводимой от непрерывнолитой заготовки теплоты.

Выполненные в ходе экспериментальной работы (при формировании модельных заготовок из камфена и алюминиевого сплава АД31) расчеты теплового баланса представлены в табл. 1. Анализ полученных данных подтверждает взаимосоответствие относительных показателей теплоотвода в сопоставимых зонах для модельного и алюминиевого образцов.

На практике при производстве непрерывнолитых заготовок для интенсификации теплоотвода часто применяют технологические приемы с использованием внешних физических воздействий. В данных исследованиях в качестве такого приема использована вибрация, которая оказала положительное влияние в интен-

сификации теплообменных процессов в кристаллизаторе (см. табл. 1), а также оказала существенное воздействие на формирование кристаллической структуры отливаемых заготовок из исследуемых сплавов (рис. 3). В экспериментах были применены различные схемы приложения вибрации к отливаемым заготовкам: I – подвод вибрации к кристаллизатору; II – подвод вибрации к кристаллизатору и заготовке.

Было установлено, что эффективность вибровоздействия на процессы кристаллизации определяются схемой подвода вибрации к исследуемой заготовке. Результаты исследований, представленные на рис. 3, б и в, демонстрируют, что наиболее эффективным вариантом воздействия вибрации на образцы из алюминия (сплав АД 31) в данных экспериментах является схема II, при которой происходит наиболее существенное изменение кристаллической структуры литых заготовок. Силовое воздействие виброимпульса на затвердевающий металл приводит к разрушению ветвей дендритов в зоне транскристаллизации и отдельных плавающих кристаллов в жидкой фазе заготовки, что приводит к измельчению макроструктуры опытных заготовок, а также к сужению зоны столбчатых кристаллов и, как следствие, к расширению зоны равноосных кристаллов (см. рис. 3, табл. 2).

Таблица 1. Баланс теплоты, отводимой от непрерывнолитых заготовок  
Table 1. The balance of heat removed from continuously cast billets

Расход тепла	Без вибрации				С вибрацией ( $A = 1$ мм; $\nu = 133$ Гц)			
	Образец из камфена		Образец из Al		Образец из камфена		Образец из Al	
	кДж	%	кДж	%	кДж	%	кДж	%
В кристаллизаторе	23	26	475	29	26	30	530	32
В зоне вторичного охлаждения	65	74	1175	71	62	70	1120	68
Всего	88	100	1650	100	88	100	1650	100

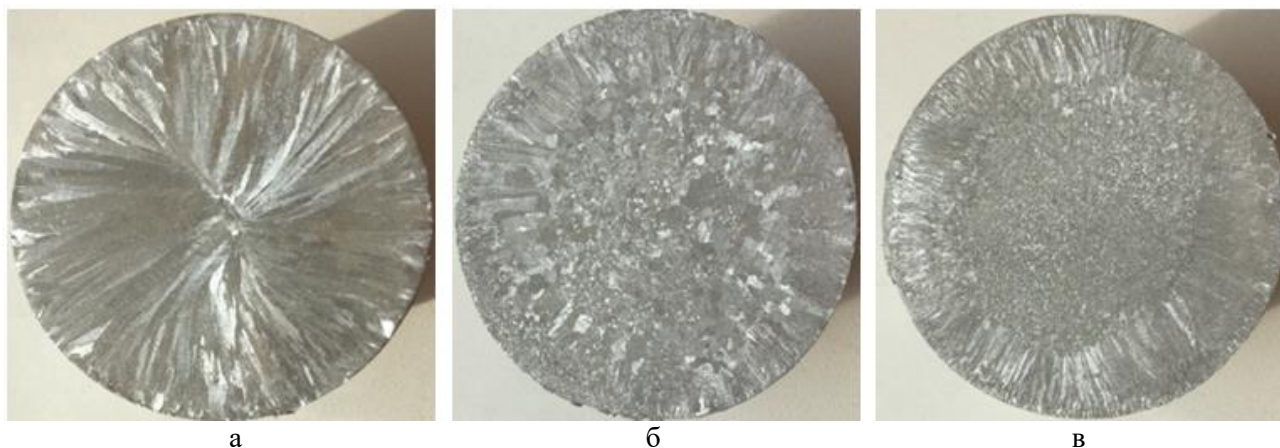


Рис. 3. Структура заготовки из алюминиевого сплава,  $\times 1$ :  
а – контрольный образец; б – подвод вибрации к кристаллизатору;  
в – подвод вибрации и к кристаллизатору, и к заготовке  
Fig. 3. The structure of the aluminum alloy billet,  $\times 1$ :  
a is a reference sample; б is vibration supplied to the mold;  
в is vibration supplied to both the mold and the billet

Таблица 2. Основные структурные параметры заготовок из сплава АД31  
Table 2. Main structural parameters of the billets made of alloy AD31

Номер образца	Зона столбчатых кристаллов, мм	Зона равноосных кристаллов, мм	Средняя длина/ширина столбчатых кристаллов, мм	Средняя длина/ширина равноосных кристаллов, мм
1 (контрольный)	20-30	2,0-4,0	1,8/0,2	3,5/2,5
2 (опытный)	14-17	18,5-21,0	0,4/0,12	0,4/0,4
3 (опытный)	10-13	21,0-24,0	0,07/0,02	0,1/0,2

Примечание. Образец №1 – без вибрации; №2 – подвод виброимпульса к кристаллизатору; №3 – одновременный подвод виброимпульса к кристаллизатору и отливаемой заготовке.

Действительно, оказалось, что влияние вибрации на дисперсность микроструктур опытных заготовок из сплава АД31 оказалось аналогичным ее воздействию на дисперсность их макроструктур (рис. 4), о котором свидетельствуют данные о среднем размере микрзерна по зонам заготовок (табл. 3).

Независимо от условий формирования, микроструктура и контрольного и опытных образцов состоит в основном из кристаллов  $\alpha$ -фазы, но при этом в контрольном образце размеры зерен  $\alpha$ -фазы почти в 2 раза больше, чем в опытных. Изменения в макро-

микроструктурах заготовок, которые произошли под воздействием вибрации, привели к соответствующим изменениям в свойствах литого металла (табл. 4). К примеру, плотность литого металла в заготовках возрастает с  $2670 \text{ кг/м}^3$  для контрольного образца до  $2685$  и  $2705 \text{ кг/м}^3$  для опытных образцов №2 и 3 соответственно. Возросли также прочностные характеристики литого металла в опытных образцах на 25-30% относительно контрольного образца при практически одинаковой их пластичности (см. табл. 4).



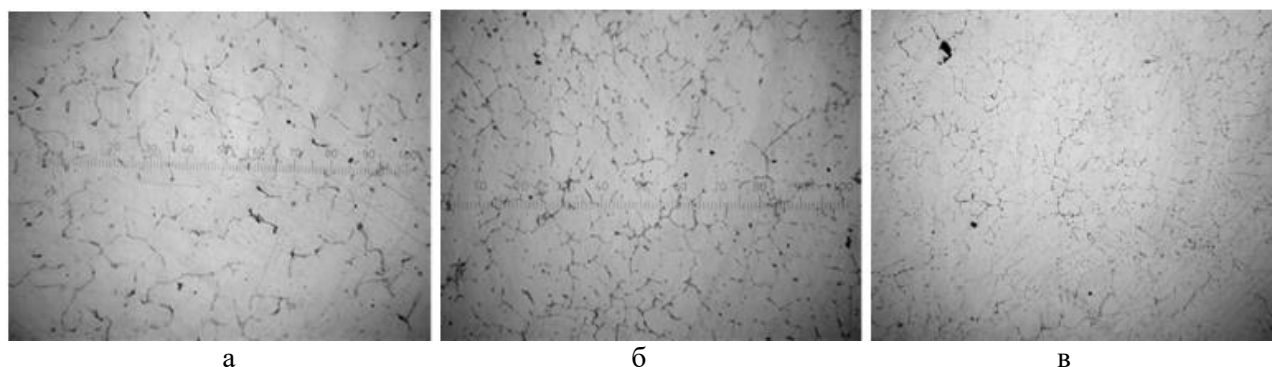


Рис. 4. Микроструктуры исследуемых образцов из сплава АД31,  $\times 200$ :  
 а – контрольный вариант (без вибрации); б – подвод виброимпульса к кристаллизатору;  
 в – одновременный подвод виброимпульса и к кристаллизатору, и к заготовке

Fig. 4. Microstructures of the samples made of alloy AD31 under study,  $\times 200$ :  
 а is a reference option (without vibration); б is a vibration pulse supplied to the mold;  
 в is a vibration pulse supplied to both the mold and the billet

Таблица 3. Средний размер микрозерен по сечению отливаемых заготовок из сплава АД31  
 T a b l e 3 . The average size of micrograins along the section of cast billets made of alloy AD31

Номер образца	Средний размер микрозерна в центральной зоне, мкм	Средний размер микрозерна в периферийной зоне, мкм
1 (контрольный)	188	385
2 (опытный)	139	179
3 (опытный)	91	162

Примечание. Образец №1 – без вибрации; №2 – подвод виброимпульса к кристаллизатору; №3 – одновременный подвод виброимпульса к кристаллизатору и отливаемой заготовке.

Таблица 4. Свойства металла в литой заготовке из сплава АД31  
 T a b l e 4 . Properties of metal in the cast billet made of alloy AD31

Сплав	Номер образца	Физические и механические характеристики литого металла			
		Плотность металла $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Предел текучести $\sigma_{02}$ , МПа	Предел прочности $\sigma_{в}$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %
АД31	1	2670	53	68	21
	2	2685	60	78	20
	3	2705	69	86	19

### Заключение

В ходе проведенных исследований по изучению воздействия вибрации на формирование полунепрерывнолитой заготовки, на интенсификацию теплоотвода от поверхности модельной (камфен) и алюминиевой полунепрерывнолитой заготовок доказано, что вибровоздействие положительно влияет на процесс теплоотвода от образца и усиливает теплообмен в зонах принудительного охлаждения. Вибрация сказывается на качестве литых заготовок и способствует повышению производительности машин непрерывного литья заготовок, что обусловлено интенсификацией отвода теплоты от затвердевающего расплава.

Результаты опытных данных по изучению воздействия вибрации на кристаллизующуюся полунепрерывнолитую заготовку свидетельствуют, что при этом,

наряду с интенсификацией теплообменных процессов, происходит повышение ее качества. Проявляется это в следующем: сужаются зоны столбчатых кристаллов, соответственно, расширяются зоны равноосных кристаллов, а также происходит измельчение макро- и микроструктуры заготовки. Такие изменения в структуре опытной заготовки повышают прочность и плотность литого металла. Лучший результат был получен при одновременном вибровоздействии как на кристаллизатор, так и на затвердевающую заготовку. К тому же проведенные исследования по изучению вопросов влияния вибровоздействия на формирование заготовок в кристаллизаторе и зоне вторичного охлаждения позволяют конструкторам предусмотреть оптимизацию конструкций этих зон в установках непрерывной и полунепрерывной разливки металлических сплавов.

## Список источников

1. Нурадинов А.С., Таранов Е.Д., Эльдарханов А.С. Влияние вибрации на теплофизические условия формирования непрерывнолитой заготовки // Процессы литья. 2011. №2. С. 34-38.
2. Нурадинов А.С., Уздиева Н.С., Ахтаев С.С.-С. Валковая разливка – прокатка высокопрочных алюминиевых сплавов // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2023. Т. 19. №1 (31). С. 58-66.
3. Кристаллизация и формирование структуры алюминиевых сплавов и отливок после внешних физических воздействий в процессе литья / Приходько О.Г., Деев В.Б., Прусов Е.С. и др. // Металлургия: технологии, инновации, качество: труды XXII Международной научно-практической конференции. Новокузнецк, 2021. С. 316-321.
4. Прусов Е.С., Деев В.Б., Рахуба Е.М. Влияние условий кристаллизации на формирование структуры композиционных сплавов // Литейное производство. 2019. №3. С. 6-8.
5. Влияние нерастворимых примесей и вибрации на кристаллизационные процессы в расплавах металлов / Уздиева Н.С., Нурадинов А.С., Ахтаев С.С.-С., Исаева М.Р. // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2023. Т. 19. №2 (32). С. 57-63.
6. Numerical simulation of the twin-roll casting process of magnesium alloy strip / Zeng J., Koitzsch R., Pfeifer H., Friedrich B. // Journal of Materials Processing Technology. 2009, vol. 209, pp. 2321-2328.
7. Смольский А.А., Семенченко А.И., Елов С.М. Термический анализ алюминиевых сплавов // Процессы литья. 2002. № 1. С. 10-16.
8. Управление теплообменными процессами в валковом кристаллизаторе при бесслитковой прокатке металлов / Эльдарханов А.С., Нурадинов А.С., Уздиева Н.С. и др. // Сталь. 2022. № 4. С. 7-11.
9. Study of the possibility of controlling the formation of crystal structure of metal alloys / Nuradinov A.S., Nogovitsyn A.V., Nuradinov I.A. and other // Science and innovation. 2020, no. 16 (4), pp. 67-73.
10. Mixing effect of slag compositions and additives on crystallization of mold fluxes for Ti-bearing steels / Wei Yan, Zhanquan Hao, Weiqing Chen, Jing Li // Journal of Materials Research and Technology. 2021, vol. 10, pp. 882-894.
11. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики. Справочник. К.: Наукова думка, 1989. 864 с.
12. Нурадинов А.С. Теплообменные процессы при формировании непрерывнолитых заготовок // Литейщик России. 2006. № 7. С. 34-37.
13. Нурадинов А.С., Эльдарханов А.С., Таранов Е.Д. Теплообменные процессы при формировании НЛЗ в поле упругих колебаний // Сталь. 2006. № 6. С. 51-52.

## References

1. Nuradinov A.S., Taranov E.D., Eldarkhanov A.S. The influence of vibration on the thermophysical conditions of forming continuously cast billets. *Protsessy litya* [Casting Processes]. 2011;(2):34-38. (In Russ.)
2. Nuradinov A.S., Uzdieva N.S., Akhtaev S.S.-S. Roll casting: rolling of high-strength aluminum alloys. *Vestnik GGNTU. Tekhnicheskie nauki* [Herald of Grozny State Oil Technical University. Technical Sciences]. 2023;19(1(31)):58-66. (In Russ.)
3. Prikhodko O.G., Deev V.B., Prusov E.S. et al. Crystallization and formation of the structure of aluminum alloys and castings after external physical actions in the casting process. *Metallurgiya: tekhnologii, innovatsii, kachestvo: trudy XXII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Metallurgy: Technologies, Innovations, Quality. Proceedings of the 22<sup>nd</sup> International Scientific and Practical Conference]. Novokuznetsk, 2021, pp. 316-321. (In Russ.)
4. Prusov E.S., Deev V.B., Rakhuba E.M. Influence of crystallization conditions on the formation of the structure of composite alloys. *Liteynoe proizvodstvo* [Foundry]. 2019;(3):6-8. (In Russ.)
5. Uzdieva N.S., Nuradinov A.S., Akhtaev S.S.-S., Isaeva M.R. Effect of insoluble impurities and vibration on crystallization processes in molten metals. *Vestnik GGNTU. Tekhnicheskie nauki* [Herald of Grozny State Oil Technical University. Technical Sciences]. 2023;19(2(32)):57-63. (In Russ.)
6. Zeng J., Koitzsch R., Pfeifer H., Friedrich B. Numerical simulation of the twin-roll casting process of magnesium alloy strip. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009;209:2321-2328.
7. Smulsky A.A., Semenchenko A.I., Elov S.M. Thermal analysis of aluminum alloys. *Protsessy litya* [Casting Processes]. 2002;(1):10-16. (In Russ.)
8. Eldarkhanov A.S., Nuradinov A.S., Uzdieva N.S. et al. Control of heat exchange processes in a roll mold during rolling from the molten condition. *Stal* [Steel]. 2022;(4):7-11. (In Russ.)
9. Nuradinov A.S., Nogovitsyn A.V., Nuradinov I.A. et al. Study of the possibility of controlling the formation of crystal structure of metal alloys. *Science and Innovation*. 2020;(16(4)):67-73.
10. Wei Yan, Zhanquan Hao, Weiqing Chen, Jing Li. Mixing effect of slag compositions and additives on crystallization of mold fluxes for Ti-bearing steels. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021;10:882-894.
11. Kuzmichev V.E. *Zakony i formuly fiziki. Spravochnik* [Laws and formulas of physics. Handbook]. Kyiv: Naukova dumka, 1989, 864 p. (In Russ.)
12. Nuradinov A.S. Heat exchange processes in the formation of continuously cast billets. *Liteyshchik Rossii* [Foundry of Russia]. 2006;(7):34-37. (In Russ.)
13. Nuradinov A.S., Eldarkhanov A.S., Taranov E.D. Heat exchange processes during the formation of con-cast billets in the field of elastic vibrations. *Stal* [Steel]. 2006;(6):51-52. (In Russ.)

Поступила 05.03.2024; принята к публикации 07.08.2024; опубликована 30.09.2024  
Submitted 05/03/2024; revised 07/08/2024; published 30/09/2024

**Уздиева Наталья Супьяновна** – кандидат технических наук, доцент,  
Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М. Д. Миллионщикова,  
Грозный, Россия.  
Email: usdv-95@yandex.ru 0009-0005-2855-2223

**Ахтаев Салман Саид-Селимович** – кандидат технических наук, доцент,  
Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М. Д. Миллионщикова,  
Грозный, Россия.  
Email: usdv-95@yandex.ru

**Айсунгуров Ноха Джабраилович** – кандидат технических наук, доцент,  
Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М. Д. Миллионщикова,  
Грозный, Россия.

**Natalia S. Uzdieva** – PhD (Eng.), Associate Professor,  
Millionshchikov Grozny State Oil Technical University, Grozny, Russia.  
Email: usdv-95@yandex.ru. 0009-0005-2855-2223

**Salman S.-S. Akhtaev** – PhD (Eng.), Associate Professor,  
Millionshchikov Grozny State Oil Technical University, Grozny, Russia.  
Email: usdv-95@yandex.ru

**Nokha D. Aisungurov** – PhD (Eng.), Associate Professor,  
Millionshchikov Grozny State Oil Technical University, Grozny, Russia.

**ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ**  
**METAL FORMING**

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

УДК 621.778.014

DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-3-60-70

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ  
ПРОКАТКИ ПОЛОСЫ НА СТАНЕ ДУО-130****Радионова Л.В.<sup>1</sup>, Громов Д.В.<sup>1</sup>, Фаизов С.Р.<sup>1</sup>, Лисовский Р.А.<sup>2</sup>, Зараменских С.Е.<sup>2</sup>, Глебов Л.А.<sup>2</sup>**<sup>1</sup> Московский политехнический университет, Москва, Россия<sup>2</sup> Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

**Аннотация.** В работе приведено описание конструктивных особенностей лабораторного научно-исследовательского стана ДУО-130 с длиной бочки валка 160 мм. Стан представленной конструкции позволяет осуществлять прокатку с максимальным усилием на валки 60 кН и допустимым моментом прокатки 710 Н·м. Максимальная скорость прокатки 0,3 м/с. Системы автоматизации и сбора данных, которыми оснащен стан, позволяют задавать межвалковый зазор и скорость прокатки и измерять усилие и момент прокатки. В ходе экспериментальной прокатки свинцовой полосы толщиной 1,2 мм из заготовки толщиной 11,5 мм в 6 проходов были измерены усилия и моменты прокатки. В работе приведены экспериментальные кривые усилий и моментов прокатки. Методика расчета усилия и момента прокатки, разработанная применительно к стану ДУО-130, учитывает конструкционные особенности стана, геометрические параметры и свойства прокатываемого материала. Сравнение экспериментальных и расчетных значений усилия и момента прокатки показало их высокую сходимость, ошибка не превышает 5%. В ходе экспериментальных исследований установлено, что момент холостого хода стана 65 Н·м. Коэффициент трения при прокатке свинцовой полосы на стальных валках равен 0,18. Показатель отношения плеча равнодействующей сил давления металла на валки к длине дуги захвата при расчете момента прокатки следует принимать равным 0,5. Предложенная методика расчета усилия и момента прокатки может быть использована для проведения аналитических исследований влияния режимов прокатки на энергосиловые параметры. Представленный в работе лабораторный прокатный стан ДУО-130 может быть задействован в научно-исследовательской деятельности при изучении новых сплавов, а также в образовательном процессе при подготовке специалистов металлургической и машиностроительной направленности.

**Ключевые слова:** прокатка, прокатный стан, усилие прокатки, момент прокатки, месдоза, среднее давление на валки, очаг деформации, стан ДУО-130

© Радионова Л.В., Громов Д.В., Фаизов С.Р., Лисовский Р.А., Зараменских С.Е., Глебов Л.А., 2024

**Для цитирования**

Методика расчета энергосиловых параметров прокатки полосы на стане ДУО-130 / Радионова Л.В., Громов Д.В., Фаизов С.Р., Лисовский Р.А., Зараменских С.Е., Глебов Л.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №3. С. 60-70. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-60-70>



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

## A METHOD FOR CALCULATING ENERGY AND POWER PARAMETERS OF STRIP ROLLING ON DUO MILL 130

Radionova L.V.<sup>1</sup>, Gromov D.V.<sup>1</sup>, Faizov S.R.<sup>1</sup>, Lisovsky R.A.<sup>2</sup>, Zaramenskikh S.E.<sup>2</sup>, Glebov L.A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

<sup>2</sup> South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

**Abstract.** The article describes the design features of laboratory research duo mill 130 with a roll body length of 160 mm. The mill of the described design provides for rolling with a maximum roll force of 60 kN and an allowable rolling torque of 710 N·m. Maximum rolling speed is 0.3 m/s. Automation and data acquisition systems of the mill are used to set the roll gap and rolling speed and measure rolling force and torque. During the experimental rolling of a lead strip, 1.2 mm thick, from a workpiece, 11.5 mm thick, in 6 passes, we measured rolling forces and torques. The research presents experimental curves of rolling forces and torques. The method for calculating rolling force and torque developed for duo mill 130 factors into the structural features of the mill, geometric parameters and properties of the rolled material. A comparison of the experimental and calculated values of rolling force and torque showed their high convergence, the error did not exceed 5%. It was established during experimental studies that idle torque of the mill was 65 N·m. The coefficient of friction when rolling the lead strip on steel rolls is 0.18. The ratio of the arm of the resultant forces of metal pressure on the rolls to length of the contact arc, when calculating rolling torque, should be taken 0.5. The proposed method for calculating rolling force and torque can be used to conduct analytical studies on the influence of rolling modes on energy and power parameters. Laboratory duo rolling mill 130 presented in the research can be used in research activities to study new alloys, as well as in the educational process, when teaching engineers for metallurgy and mechanical engineering sectors.

**Keywords:** rolling, rolling mill, rolling force, rolling torque, load cell, average roll pressure, deformation zone, duo mill 130

### For citation

Radionova L.V., Gromov D.V., Faizov S.R., Lisovsky R.A., Zaramenskikh S.E., Glebov L.A. A Method for Calculating Energy and Power Parameters of Strip Rolling on Duo Mill 130. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 3, pp. 60-70. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-60-70>

### Введение

При разработке новых сплавов, технологий их последующей обработки, а также при проектировании прокатного оборудования необходимо определять не только закономерности изменения физико-механических свойств материалов при пластической деформации, но и энергосиловые параметры, необходимые для осуществления формоизменения.

Прокатное производство является одним из основных переделов металлургической промышленности [1]. До 90% всей выплавляемой стали, а также большую часть цветных металлов подвергают прокатке [2]. Металлургическая отрасль России по уровню технологий и применяемого оборудования находится на мировом уровне [3], а разработке новых сплавов с уникальными свойствами в нашей стране в настоящее время уделяется особое внимание [4-7].

Для проведения исследований и отработки технологий прокатки разрабатываемых сплавов в России имеется несколько специализированных лабораторий, наиболее известные располагаются в научно-исследовательских институтах, таких как ГНЦ ФГУП «ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина» [8], НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ [9] и др. При грантовой поддержке государственных фондов в последние го-

ды создаются исследовательские лаборатории в университетах. Оснащаются такие лаборатории современным научно-исследовательским оборудованием, и в качестве одного из примеров можно отметить лабораторию «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева» в МГТУ им. Г.И. Носова [10]. Ведущие металлургические компании также активно включились в процесс оснащения современным научно-исследовательским и учебным оборудованием корпоративных образовательных и научных центров, профильных вузов и колледжей [11, 12], партнерские отношения с которыми поддерживают на протяжении многих лет. Современное автоматизированное оборудование, такое как прокатный или волочильный стан, сопровождается методическим обеспечением [13, 14], что позволяет максимально полно и грамотно использовать его технические возможности.

В работе [15] показано, что одна из основных характеристик процесса прокатки – давление металла на валки – имеет большое количество методик расчета, которые дают существенные расхождения в расчетах. Методики расчета энергосиловых параметров прокатки в разные годы были предложены ведущими прокатчиками – академиком А.И. Целиковым [16, 17], С.И. Губкиным [18], А.А. Королевым [19] и др. Расхождения в расчетах авторы работы [20] объясняют

существенными отличиями прокатных станов, для которых методики были предложены и особенностями типов прокатки – горячая, холодная, толстолистовая, тонколистовая, а также геометрией (высотой) очага деформации. В то же время анализ этих методик показывает [21], что принципы расчета среднего давления металла на валки схожи, и обоснованное применение коэффициентов, которые присутствуют в формулах, позволяют получать адекватные практическим измерениям значения энергосиловых параметров прокатки [22]. При выборе значений коэффициентов, учитывающих скорость деформации, напряженно-деформированное состояние, натяжение, контактное трение и др., нужно отталкиваться от технологических параметров прокатки и конструктивных особенностей конкретного прокатного стана.

В связи с вышесказанным целью настоящей работы является разработка методики расчета энергосиловых параметров прокатки применительно к стану ДУО-130 с учетом его конструктивных особенностей, геометрических параметров прокатываемой полосы и реализуемых технологических режимов.

#### Конструктивные особенности стана ДУО-130

Прокатный стан ДУО-130 состоит из трех конструктивных объектов: главной линии прокатной клетки (рис. 1), шкафа (рис. 2, а) и пульта (рис. 2, б) управления. Рабочая клетка прокатного стана ДУО-130 (рис. 3, а) имеет два валка диаметром 130 мм ( $R = 65$  мм) и длиной 160 мм, которые посредством подушек установлены в станину. Для подачи заготовки в валки и приема проката после деформации на рабочей клетке смонтирован приемно-задающий стол (рис. 3, а). Нажимной механизм рабочей клетки (рис. 3, б) реализован электромеханическим способом с применением шагового двигателя.

Для измерения усилия прокатки конструкцией предусмотрена возможность установки мессдоз. Прокатные валки приводятся в движение мотор-редуктором с асинхронным двигателем мощностью 5,5 кВт со скоростью вращения до 1440 об/мин. Для измерения скорости прокатки применяется инкрементальный энкодер, установленный на валу двигателя мотор-редуктора. Установка и определение зазора между валками осуществляется с помощью шагового двигателя с энкодером (см. рис. 3, а). Для определения усилия прокатки между нажимным винтом и подушкой установлена мессдоза типа шайба с допустимым давлением 40 кН (см. рис. 3, б). Стан представленной конструкции позволяет осуществлять прокатку с максимальным усилием на валки 60 кН и допустимым моментом прокатки 710 Н·м. Максимальная скорость прокатки 0,3 м/с.

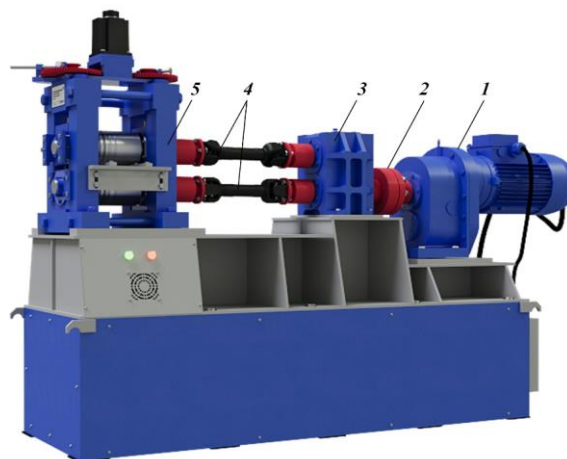


Рис. 1. Главная линия прокатной клетки стана ДУО-130:  
1 – мотор-редуктор; 2 – муфта;  
3 – шестеренная клетка; 4 – универсальный шпиндель; 5 – рабочая клетка

Fig. 1. The main drive system of duo rolling mill 130:  
1 is an electric motor gearbox; 2 is a coupling;  
3 is a pinion stand; 4 is a universal spindle;  
5 is a rolling stand

Управление двигателем осуществляется преобразователем частоты с векторным управлением и обратной связью по скорости. Преобразователь частоты установлен в шкафу управления станом (см. рис. 2, б). Сигналы задания на него поступают с программируемого логического контроллера (ПЛК). На контроллер поступают сигналы с мессдоз через весовые преобразователи. ПЛК связывается с компьютером и передает информацию о всех технологических переменных процесса. Человеко-машинный интерфейс позволяет оператору управлять процессом через пульт управления. На лицевой панели пульта (см. рис. 2, а) располагаются сенсорный экран, кнопки управления, ручки регулировки скорости и сигнальные лампы. На сенсорном мониторе посредством специального программного обеспечения отображаются основные параметры процесса: общее усилие прокатки, скорость прокатки, зазор между валками, момент на валу редуктора.

Система автоматизации позволяет осуществлять управление станом путем изменения скорости вращения валков и выставлением межвалкового зазора, а система сбора данных фиксировать технологические параметры и определять усилие и момент прокатки. На экран сенсорного монитора выводится информация о технологических режимах прокатки, введенная оператором стана, и энергосиловые характеристики, полученные с датчиков, установленных на стане (рис. 4).



Рис. 2. Пульта (а) и шкафа (б) управления стана ДУО-130  
 Fig. 2. The control panel (a) and an automation cabinet (б) of duo rolling mill 130

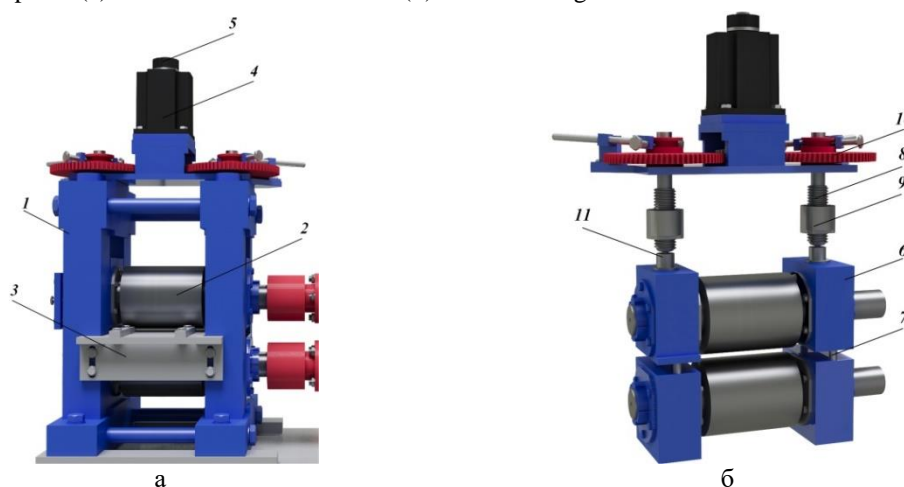


Рис. 3. Рабочая клеть прокатного стана ДУО-130: общий вид (а), электромеханический нажимной механизм (б);  
 1 – станина; 2 – универсальные валки; 3 – приемно-задающий стол; 4 – шаговый электродвигатель;  
 5 – энкодер; 6 – подушка; 7 – уравнивающее устройство; 8 – нажимной винт; 9 – нажимная гайка;  
 10 – шестерня; 11 – мессдоза  
 Fig. 3. The rolling stand of duo mill 130: a general view (а), electromechanical screw-down mechanism (б);  
 1 is a housing; 2 are universal rolls; 3 is a receiving and feeding table; 4 is a stepper motor; 5 is an encoder;  
 6 is a roll chock; 7 is a counterbalance; 8 is an adjusting screw; 9 is a screw box; 10 is a pinion gear;  
 11 is a load cell

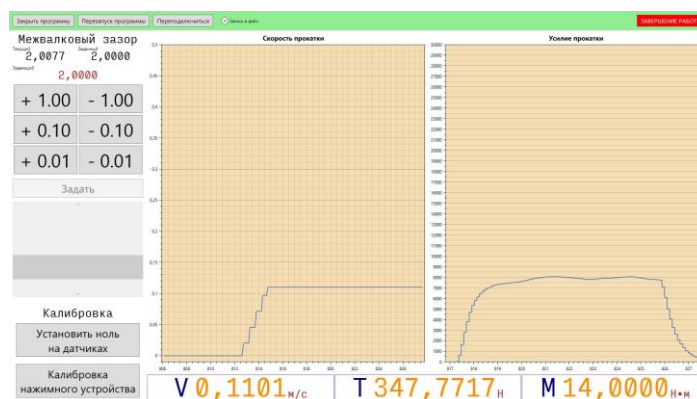


Рис. 4. Экран при прокатке полосы из заготовки  $h_0 = 3,15$  мм с межвалковым зазором  $h_{\text{зазор}} = 2,00$  мм  
 Fig. 4. A screen when rolling strips from the billet,  $h_0 = 3.15$  mm, with roll gap  $h_{\text{gap}} = 2.00$  mm

**Экспериментальное определение усилия и момента прокатки свинцовой полосы**

Экспериментальная прокатка литых заготовок размером 11,5×51,0×200,0 мм из свинца марки С1 (99,95% Pb) осуществляется при комнатной температуре. Скорость прокатки составляла 0,11 м/с. Коэффициент трения при прокатке свинца согласно литературным источникам может быть от 0,15 до 0,30 [13]. Сопротивление деформации свинца марки С1  $\sigma_s = 10$  МПа. Температура рекристаллизации свинца составляет -33°C.

Режимы деформации и измеренные средние (экспериментальные) значения усилия прокатки указаны в табл. 1. Экспериментальные кривые усилия прокатки по проходам, полученные при измерениях на стане ДУО-130, представлены на рис. 5. В ходе экспериментальной прокатки измерялись геометрические размеры проката – толщина и ширина. Это позволило рассчитать абсолютное обжатие, уширение при прокатке, суммарное относительное обжатие. Стоит обратить внимание на то, что толщина полосы после прокатки отличается от межвалкового зазора при прокатке (см. рис. 4 и табл. 1). Это связано с упругим сжатием валков, жесткостью клетки и упругой деформацией прокатываемого металла.

Уширение металла при прокатке наблюдается до толщины проката 3,15 мм. В пятом и последующих проходах уширение металла отсутствует, связано это с изменением соотношения высоты к ширине полосы в процессе прокатки.

Измерение момента прокатки реализовано посредством системы автоматизации прокатного стана. Сигнал, пропорциональный моменту на валу двигателя, снимается с преобразователя частоты. На рис. 6

приведена нагрузочная диаграмма для прокатки в 6 проходов (см. табл. 1). Поскольку в конструкции имеется редуктор с передаточным числом  $j_{ред} = 32,66$ , момент прокатки (суммарный момент на бочке верхнего и нижнего валков) будет равен

$$M_{пр} = M_{дв} \cdot j_{ред} - M_{хх}, \quad (1)$$

где  $M_{хх}$  – момент, соответствующий силам трения в подшипниках и передаточных элементах клетки, включая двигатель, приведенный к скорости вращения валков, Н·м.

В каждом проходе нагрузочная диаграмма имеет четыре характерных участка (рис. 6 и 7). На участке 1 происходит разгон стана и момент, создаваемый двигателем на валках клетки, соответствует сумме момента холостого хода  $M_{хх}$  и динамического момента, необходимого для создания запаса кинетической энергии вращающихся масс:

$$M_{дин} = J \cdot \frac{d\omega}{dt}, \quad (2)$$

где  $J$  – момент инерции всех вращающихся элементов клетки, Н·м;  $\frac{d\omega}{dt}$  – ускорение при разгоне.

На участках 2 и 4 валки вращаются вхолостую и момент двигателя идет только на преодоление момента холостого хода  $M_{хх}$ . На участке 3 осуществляется прокатка металла и двигатель преодолевает как сопротивление момента холостого хода  $M_{хх}$ , так и момента прокатки  $M_{пр}$ .

Таблица 1. Экспериментальные значения усилия прокатки полосы  
Table 1. Experimental values of strip rolling force

Номер прохода	Межвалковый зазор $h_{зазор}$ , мм	Толщина полосы до прокатки $h_0$ , мм	Толщина полосы после прокатки $h_1$ , мм	Ширина полосы до прокатки $b_0$ , мм	Ширина полосы после прокатки $b_1$ , мм	Абсолютное уширение $\Delta b$ , мм	Абсолютное обжатие $\Delta h$ , мм	Суммарное относительное обжатие $\varepsilon_h = \frac{\Delta h}{h_0}$	Экспериментальное усилие прокатки $P_{экс}$ , Н
1	9,0	11,50	9,10	51,0	52,0	1,0	2,40	0,21	8000
2	7,0	9,10	7,10	52,0	52,8	0,8	2,00	0,38	7700
3	5,0	7,10	5,15	52,8	53,3	0,5	1,95	0,55	8500
4	3,0	5,15	3,15	53,3	53,8	0,5	2,00	0,73	9800
5	2,0	3,15	2,15	53,8	53,8	0	1,00	0,81	8000
6	1,0	2,15	1,20	53,8	53,8	0	0,95	0,90	11000



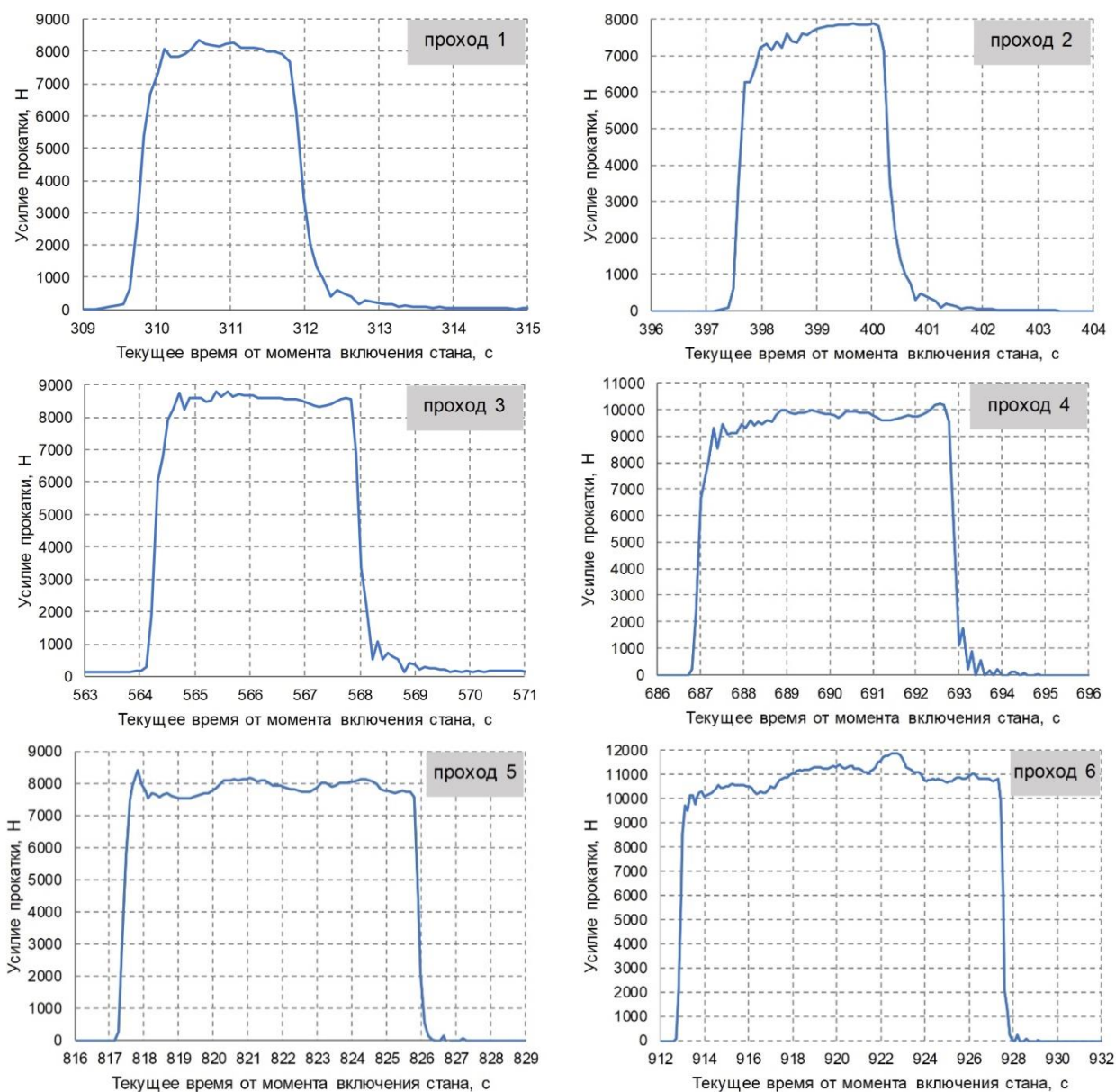


Рис. 5. Экспериментальные кривые усилия прокатки полосы по проходам

Fig. 5. Experimental curves of strip rolling force in passes

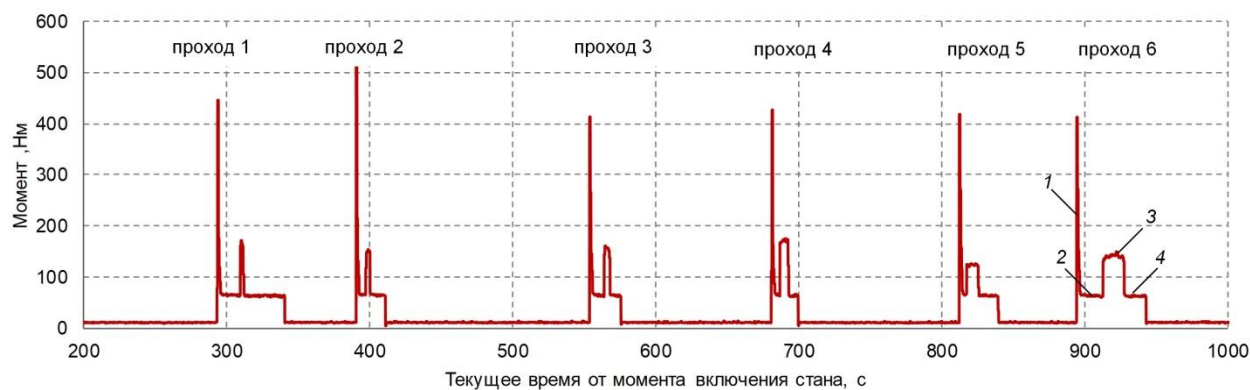


Рис. 6. Нагрузочная диаграмма для прокатки в 6 проходов

Fig. 6. A load diagram of rolling in 6 passes

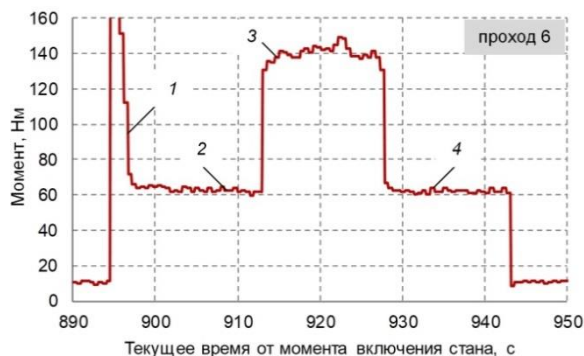


Рис. 7. Нагрузочная диаграмма для прокатки в 6-м проходе  
 Fig. 7. A load diagram of rolling in the 6<sup>th</sup> pass

**Определение усилия и момента прокатки расчетным методом**

Для теоретического определения усилия прокатки необходимо рассмотреть очаг деформации (рис. 8). При прокатке на стане ДУО-130 реализуется самый процесс листовой прокатки, когда на металл действуют только силы от валков, движение металла при входе и выходе равномерное, оба валка приводные, имеют одинаковые скорости и диаметры, металл имеет известное сопротивление деформации.

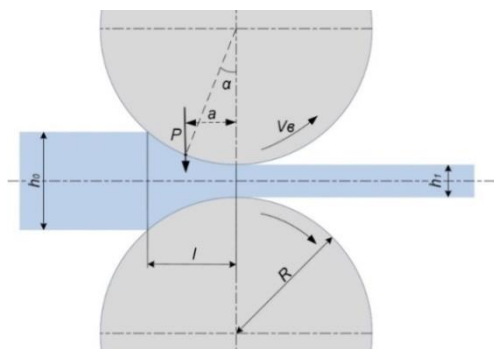


Рис. 8. Очаг деформации при листовой прокатке на стане ДУО-130  
 Fig. 8. Deformation zone during sheet rolling on duo mill 130

В этом случае определение усилия прокатки сводится к определению площади контакта прокатываемого металла с валками и установлению среднего удельного давления металла на валки  $p_{cp}$ :

$$P = p_{cp} \cdot F_k, \tag{3}$$

где  $F_k$  – площадь контакта металла с валками, мм<sup>2</sup>;  $p_{cp}$  – среднее удельное давление металла на валки, МПа.

При прокатке на гладкой бочке и наличии уширения площадь контакта определяют как

$$F_k = \frac{b_0 + b_1}{2} \cdot l, \tag{4}$$

где  $b_0$  – ширина полосы до прокатки, мм;  $b_1$  – ширина полосы после прокатки, мм;  $l$  – длина дуги захвата, мм.

Длину дуги захвата определяем как

$$l = \sqrt{\Delta h \cdot R}, \tag{5}$$

где  $\Delta h = h_0 - h_1$  – абсолютное обжатие, мм;  $R$  – радиус валка, мм.

Для определения среднего давления металла на валки, как было отмечено выше, имеется множество формул, но в настоящем расчете мы воспользуемся формулой А.И. Целикова [16] для горячей прокатки:

$$p_{cp} = n_\gamma \cdot n_b \cdot n_\sigma \cdot \sigma_s, \tag{6}$$

где  $n_\gamma = 1,00-1,15$  – коэффициент, учитывающий влияние схемы деформированного состояния. При отсутствии уширения  $n_\gamma = 1,15$ ;  $n_b$  – коэффициент, учитывающий влияние ширины полосы. При  $\frac{b}{l} \approx 5$ , произведение коэффициентов  $n_\gamma \cdot n_b = 1$ , а при  $\frac{b}{l} > 5$ , то  $n_\gamma \cdot n_b = 1,15$ ;  $n_\sigma = 0,8-8,0$  – коэффициент, учитывающий напряженное состояние, зависящее от внешнего трения, внешних зон и натяжения;  $\sigma_s$  – среднее значение сопротивления деформации.

Для листовой холодной прокатки без натяжения в работе [17] рекомендуется рассчитывать среднее удельное давление по формуле

$$p_{cp} = 1,15 \cdot \sigma_s \cdot \frac{2h_n}{\Delta h(\delta - 1)} \left[ \left( \frac{h_n}{h_1} \right)^\delta - 1 \right], \tag{7}$$

где  $\delta = \frac{2 \cdot f \cdot l}{\Delta h}$  – параметр Целикова;  $f$  – коэффициент трения;

$$h_n = h_1 \cdot \left( \frac{1 + \sqrt{1 + (\delta^2 - 1) \cdot \left( \frac{h_0}{h_1} \right)^\delta}}{\delta + 1} \right)^{\frac{1}{\delta}} \tag{8}$$

– высота очага деформации в нейтральном сечении, мм.

Результаты расчета по приведенной выше методике для режимов экспериментальной прокатки (см. табл. 1) приведены в табл. 2.

Таблица 2. Расчетные значения усилия прокатки полосы  
Table 2. Calculated values of strip rolling force

Номер прохода	Толщина полосы после прокатки $h_1$ , мм	Длина дуги захвата $l$ , мм	Площадь контакта металла с валками $F_{кв}$ , мм <sup>2</sup>	Коэффициент трения $f$	Среднее значение сопротивления деформации $\sigma_s$ , МПа	Среднее удельное давление металла на валки $p_{ср}$ , МПа	Расчетное усилие прокатки $P$ , Н
1	9,10	12,5	643,2	0,18	10,0	12,5	8021
2	7,10	11,4	597,5	0,18	10,0	12,7	7597
3	5,15	11,3	597,3	0,18	11,0	14,5	8637
4	3,15	11,4	610,6	0,18	11,5	16,2	9909
5	2,15	8,1	433,7	0,18	12,0	17,9	7750
6	1,20	7,9	422,8	0,18	14,5	25,3	10708

Момент, необходимый для вращения валков прокатного стана

$$M = M_{пр} + M_{хх} + M_{дин}, \quad (8)$$

где  $M_{пр}$  – момент прокатки, требуемый для преодоления сил деформации прокатываемого металла и сил трения между металлом и валками, Н·м;  $M_{хх}$  – момент холостого хода, Н·м;  $M_{дин}$  – динамический момент, необходимый для преодоления сил инерции и в установившемся режиме прокатки равный нулю, Н·м.

Момент прокатки может быть определен как

$$M_{пр} = 2 \cdot P \cdot a = 2 \cdot P \cdot \psi \cdot l, \quad (9)$$

где  $\psi = \frac{a}{l}$  – отношение плеча  $a$  равнодействующей сил давления к длине дуги захвата  $l$  (см. рис. 6).

Экспериментальные данные [24, 25] показывают, что на высоких очагах деформации  $\psi = 0,50-0,57$ , а на низких очагах деформации уменьшается до 0,28. В нашем случае при подстановке  $\psi = 0,50$  расчетные значения момента прокатки (табл. 3) с высокой точностью совпадают с экспериментальными.

Расчетные значения усилия и момента прокатки совпадают с экспериментальными, полученными при прямом измерении в ходе прокатки, с ошибкой не более 5%. Методика расчета усилия прокатки, рекомендованная А.И. Целиковым, и допущения, принятые для анализируемого процесса прокатки свинцо-

вой полосы на стане ДУО-130, позволяют говорить об ее адекватности и возможности использования для аналитических исследований. Возможность применения этой методики для других сплавов и типоразмеров проката требует проведения их экспериментальной прокатки на стане ДУО-130 для определения коэффициентов, учитывающих особенности процесса.

### Заключение

В работе приведено описание конструктивных особенностей лабораторного научно-исследовательского стана ДУО-130, позволяющего осуществлять прокатку полосы шириной до 150 мм. Системы автоматизации и сбора данных, которыми оснащен стан, позволяют задавать межвалковый зазор и скорость прокатки и измерять усилие и момент прокатки. Измеренные значения усилия и момента при прокатке свинцовой полосы в 6 проходов с высокой точностью, ошибка не превышала 5%, соответствуют расчетным. Методика расчета усилия и момента прокатки, разработанная применительно к стану ДУО-130, может быть использована для проведения аналитических исследований влияния режимов прокатки на энергосиловые параметры.

Представленный в работе лабораторный прокатный стан ДУО-130 может быть задействован в образовательном процессе при подготовке специалистов металлургической и машиностроительной направленности.

Таблица 3. Экспериментальные и расчетные значения момента прокатки полосы  
Table 3. Experimental and calculated values of strip rolling torque

Номер прохода	Измеренный момент $M_{изм}$ , Н·м	Момент холостого хода $M_{хх}$ , Н·м	Момент прокатки экспериментальный $M_{пр,э}$ , Н·м	Момент прокатки расчетный $M_{пр,р}$ , Н·м
1	165	65	100	100
2	150	65	85	86
3	160	65	95	97
4	170	65	105	108
5	125	65	60	62
6	145	65	80	81

## Список источников

1. Гугис Н.Н. Развитие прокатного производства в Российской Федерации в 2019-2022 годах // *Сталь*. 2023. №2. С. 14-26. EDN WPTQJS.
2. Шаталов Р.Л. Расчет, проектирование и применение прокатного оборудования: учеб. пособие. Вологда: ООО «Издательство "Инфра-Инженерия"», 2020. 236 с. EDN CGZYRN.
3. Штанский В.А. Обеспечение устойчивого инновационного развития предприятий металлургического комплекса // *Экономика промышленности*. 2019. Т. 12. №4. С. 466-472. DOI: 10.17073/2072-1633-2019-4-466-472. EDN IEDGIS.
4. Закономерности формирования и особенности влияния тонкой структуры на свойства магниевого сплава нового поколения / Е.Ф. Волкова, В.А. Дуюнова, И.В. Мостяев, М.В. Акинина // *Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей»*. 2020. №1(32). С. 55-63. DOI: 10.38013/2542-0542-2020-1-55-63. EDN IGFQBQ.
5. Захаров В.В., Филатов Ю.А., Телешов В.В. Работы ОАО «ВИЛС» в области создания деформируемых алюминиевых сплавов на основе новых систем легирования // *Технология легких сплавов*. 2018. №4. С. 16-23. EDN YZAJDV.
6. Эволюция микроструктуры и механических свойств нового деформируемого сплава системы Al-Cu-Fe / А.В. Поздняков, Р.Ю. Барков, Ж. Сарсенбаев и др. // *Физика металлов и металловедение*. 2019. Т. 120. №6. С. 668-672. DOI: 10.1134/S0015323019060093. EDN UCKMJM.
7. Физико-химические характеристики новых комплексных ниобийсодержащих сплавов / О.В. Заякин, И.Н. Кель, Д.С. Ренев и др. // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2023. Т. 66. №5. С. 616-622. DOI: 10.17073/0368-0797-2023-5-616-622. EDN WDWEQI.
8. <https://www.thermet.net/production/> (дата обращения 10.12.2023)
9. <https://viam.ru/news/7062#> (дата обращения 10.12.2023)
10. Исследование особенности формирования структуры стали 08Ю при асимметричной прокатке на новом стане 400 / Н.В. Копцева, Ю.Ю. Ефимова, А.М. Песин, М.В. Чукин // *Черные металлы*. 2022. №10. С. 39-44. DOI: 10.17580/chm.2022.10.07. EDN LQNOKQ.
11. Учебно-исследовательский прокатный стан ДУО-130 / Л.В. Радионова, Р.А. Лисовский, С.Р. Фаизов и др. // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. 2023. Т. 10. №1. С. 61-66. DOI: 10.24892/RIJE/20230112. EDN OSVNAE.
12. Научно-исследовательский волочильный стан / Л.В. Радионова, Р.А. Лисовский, С.Р. Фаизов и др. // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. 2023. Т. 10. №3. С. 51-55. DOI: 10.24892/RIJE/20230310. EDN RAQMSS.
13. Физическое моделирование при изучении студентами теории и технологии прокатки / Л.В. Радионова, Р.А. Лисовский, Д.В. Громов и др. // *Вестник Южно-Уральского государственного университета*. Серия: Металлургия. 2023. Т. 23. №2. С. 23-42. DOI: 10.14529/met230203. EDN RGPZMK.
14. Дубинский Ф.С. Учебно-исследовательский тренажер-имитатор процессов сортовой прокатки / Ф.С. Дубинский, М.А. Соседкова, П.А. Мальцев // *Вестник Южно-Уральского государственного университета*. Серия: Металлургия. 2015. Т. 15. №2. С. 120-125. EDN TQIWTP.
15. Гасияров В.Р., Радионов А.А., Пузанкова Е.А. Методика расчета момента прокатки на толстолистовом стане 5000 // *Электротехнические системы и комплексы*. 2009. №16. С. 100-109. EDN QMNNKP.
16. Целиков А.И. Теория расчета усилий в прокатных станах. М.: Металлургиздат, 1962. 495 с. EDN YKTGIN.
17. Целиков А.И., Никитин Г.С., Рокотян С.Е. Теория продольной прокатки. М.: Металлургия, 1980. 320 с.
18. Губкин С.И. Теория обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1947. 423 с.
19. Королев А.А. Прокатные станы и оборудование прокатных цехов. Атлас. Т. 2. М.: Металлургия, 1981. 208 с.
20. Гасияров В.Р., Радионов А.А., Усатый Д.Ю. Разработка уточнённой методики расчёта момента на валу двигателя клетки толстолистового стана горячей прокатки и проверка её адекватности // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. 2011. №4. С. 78-81. EDN ODZISV.
21. Тонкослябовые литейно-прокатные агрегаты для производства стальных полос: учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности «Обработка металлов давлением», направления подготовки дипломированных специалистов «Металлургия» / В.М. Салганик, И.Г. Гун, А.С. Карандаев, А.А. Радионов. М.: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2003. 506 с. EDN QNANGB.
22. Исследование энергосиловых параметров холодной прокатки листа на стане 2500 ОАО «ММК» / В.М. Салганик, А.А. Радионов, В.А. Антипенко, В.В. Андросенко // *Электротехнические системы и комплексы*. 2000. №5. С. 114-120. EDN QMNKAD.
23. Решение технологических задач ОМД на микроЭВМ: учеб. пособие для студентов, аспирантов, преподавателей и инженеров-технологов, использующих персональную вычислительную технику / В.Л. Колмогоров, С.И. Паршаков, С.П. Буркин и др. М.: Металлургия, 1993. 320 с. EDN WZELDM.
24. Румянцев М.И., Кинзин Д.И. Теория прокатки / Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2017. 188 с. EDN XQPULB.
25. Рудской А.И., Лунев В.А. Теория и технология прокатного производства: учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению «Металлургия» / Федеральное агентство по образованию, Санкт-Петербургский гос. политехн. ун-т. Санкт-Петербург: Наука, 2008. EDN QNCBAH.

## References

- Gugis N.N. Development of rolling production in the Russian Federation in 2019-2022. *Stal* [Steel]. 2023;(2):14-26. (In Russ.)
- Shatalov R.L. *Raschet, proektirovanie i primeneniye prokatnogo oborudovaniya: ucheb. posobie* [Calculation, design and application of rolling equipment: study guide]. Vologda: LLC Infra-Inzheneriya Publishing House, 2020, 236 p. (In Russ.) EDN CGZYRH. ISBN 978-5-9729-0434-4
- Shtansky V.A. Ensuring sustainable innovative development of enterprises of the metallurgical complex. *Ekonomika promyshlennosti* [Russian Journal of Industrial Economics]. 2019;12(4):466-472. (In Russ.) DOI:10.17073/2072-1633-2019-4-466-472. EDN IEDGIS
- Volkova E.F., Duyunova V.A., Mostyaev I.V., Akinina M.V. Regularities of the formation and features of the influence of a fine structure on the properties of a new generation magnesium alloy. *Vestnik Kontserna VKO Almaz – Antey* [Journal of Almaz – Antey Air and Space Defence Corporation]. 2020;(1(32)):55-63. (In Russ.) <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-1-55-63>. EDN IGFQBQ
- Zakharov V.V., Filatov Yu.A., Teleshov V.V. Research of OJSC VILS in the field of developing deformable aluminum alloys based on new alloying systems. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of Light Alloys]. 2018;(4):16-23. (In Russ.). EDN YZAJDV
- Pozdnyakov A.V., Barkov R.Yu., Sarsenbaev Zh. et al. Evolution of microstructure and mechanical properties of a new Al–Cu–Er wrought alloy. *Physics of Metals and Metallography*. 2019;120(6):614-619. DOI: 10.1134/S0031918X19060097. EDN HCYDXA
- Zayakin O.V., Kel I.N., Renev D.S. et al. Physico-chemical characteristics of new complex niobium-containing alloys. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy]. 2023;66(5):616-622. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-5-616-622>. EDN WDWEQI
- Available at: <https://www.chermet.net/production/> (Accessed on December 10, 2023)
- Available at: <https://viam.ru/news/7062#> (Accessed on December 10, 2023)
- Koptseva N.V., Efimova Yu.Yu., Pesin A.M., Chukin M.V. Investigation of the features of the formation of the structure of steel 08Yu during asymmetric rolling on a new mill 400. *Chernye metally* [Ferrous Metals]. 2022;(10):39-44. (In Russ.) DOI: 10.17580/chm.2022.10.07. EDN: LQNOKQ
- Radionova L.V., Lisovsky R.A., Faizov S.R. et al. Educational and research duo rolling mill 130. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyi nauchnyi zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering]. 2023;10(1):61-66. (In Russ.) DOI: 10.24892/RIJIE/20230112. EDN OSVHAE
- Radionova L.V., Lisovsky R.A., Faizov S.R. et al. A wire drawing machine for research. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyi nauchnyi zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering]. 2023;10(3):51-55. (In Russ.) DOI: 10.24892/RIJIE/20230310. EDN RAQMSS
- Radionova L.V., Lisovsky R.A., Gromov D.V. et al. Physical simulation when students study theory and technologies of rolling. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Metallurgiya* [Bulletin of South Ural State University. Series: Metallurgy]. 2023;23(2):23-42. (In Russ.) DOI: 10.14529/met230203. EDN RGPZMK
- Dubinskiy F.S., Sosedkova M.A., Maltsev P.A. Research and training simulator of shape rolling process. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Metallurgiya* [Bulletin of South Ural State University. Series: Metallurgy]. 2015;15(2):120-125. (In Russ.) EDN TQIWTP
- Gasiyarov V.R., Radionov A.A., Puzankova E.A. Methods of calculating rolling torque on plate mill 5000. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrical Systems and Complexes]. 2009;(16):100-109. (In Russ.) EDN QMNNKP
- Tselikov A.I. *Teoriya rascheta usily v prokatnykh stanakh* [Theory of calculating forces in rolling mills]. Moscow: Metallurgizdat, 1962, 495 p. (In Russ.) EDN YKTGIH
- Tselikov A.I., Nikitin G.S., Rokotyan S.E. Theory of longitudinal rolling. Moscow: Metallurgiya, 1980, 320 p. (In Russ.)
- Gubkin S.I. *Teoriya obrabotki metallov davleniem* [Theory of metal forming]. Moscow: Metallurgiya, 1947, 423 p. (In Russ.)
- Korolev A.A. *Prokatnye stany i oborudovanie prokatnykh tsekhov. Atlas* [Rolling mills and equipment of rolling shops. Atlas]. Volume 2. Moscow: Metallurgiya, 1981, 208 p. (In Russ.)
- Gasiyarov V.R., Radionov A.A., Usaty D.Yu. Developing an updated methodology for calculating torque of the motor shaft for stands of the hot plate rolling mill and checking its adequacy. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics]. 2011;(4):78-81. (In Russ.) EDN ODZISV
- Salganik V.M., Gun I.G., Karandaev A.S., Radionov A.A. *Tonkoslyabovye liteyno-prokatnye agregaty dlya proizvodstva stalnykh polos: ucheb. posobie dlya studentov vuzov, obuchayushchikhsya po spetsialnosti «Obrabotka metallov davleniem», napravleniya podgotovki diplomirovannykh spetsialistov «Metallurgiya»* [Thin slab casting and rolling facilities for producing steel strips: study guide for university students majoring in metal forming, the metallurgy field of study]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University (national research university), 2003, 506 p. (In Russ.) EDN QNANGB
- Salganik V.M., Radionov A.A., Antipenko V.A., Androsenko V.V. Study on energy and power parameters of cold rolling of sheet metal on mill 2500 at OJSC

- ММК. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrical Systems and Complexes]. 2000;(5):114-120. (In Russ.) EDN QMNKAD
23. Kolmogorov V.L., Parshakov S.I., Burkin S.P. et al. *Reshenie tekhnologicheskikh zadach OMD na mikroEVM: ucheb. posobie dlya studentov, aspirantov, преподаvateley i inzhenerov-tekhnologov, ispolzuyushchikh personalnyuyu vychislitelnyuyu tekhniku* [Solution of technological problems of metal forming using a microcomputer: study guide for students, postgraduate students, university teachers and technology engineers using personal computing equipment]. Moscow: Metallurgiya, 1993, 320 p. EDN WZELDM
24. Rumyantsev M.I., Kinzin D.I. *Teoriya prokatki* [Rolling theory]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2017, 188 p. (In Russ.) EDN XQPULB
25. Rudskoy A.I., Lunev V.A. *Teoriya i tekhnologiya prokatnogo proizvodstva: ucheb. posobie dlya studentov vuzov, obuchayushchikhsya po napravleniyu «Metallurgiya»*; *Federalnoe agentstvo po obrazovaniyu, Sankt-Peterburgskiy gos. politekhn. un-t* [Theory and technology of rolling: study guide for university students majoring in metallurgy; Federal Agency for Education, Saint Petersburg State Polytechnic University]. Saint Petersburg: Nauka, 2008. (In Russ.) ISBN 978-5-02-025302-5. EDN QNCBAH

Поступила 01.02.2024; принята к публикации 20.02.2024; опубликована 30.09.2024

Submitted 01/02/2024; revised 20/02/2024; published 30/09/2024

**Радионова Людмила Владимировна** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Металлургия», Московский политехнический университет, Москва, Россия.  
Email: radionoalv@rambler.ru. ORCID 0000-0001-9587-2925

**Громов Дмитрий Владимирович** – аспирант кафедры «Металлургия», Московский политехнический университет, Москва, Россия.  
Email: gromov111999@gmail.com. ORCID 0000-0001-6036-3784

**Фаизов Сергей Радиевич** – младший научный сотрудник кафедры «Автоматика и управление», Московский политехнический университет, Москва, Россия.  
Email: faizovsergey@gmail.com. ORCID 0000-0001-6644-1173

**Лисовский Роман Андреевич** – инженер-программист НИИ «Учебная техника и технологии», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.  
Email: lisovskiira@susu.ru. ORCID 0000-0002-8857-2606

**Зараменских Сергей Евгеньевич** – инженер-конструктор НИИ «Учебная техника и технологии», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.  
Email: s.zaramenskih@yandex.ru. ORCID 0000-0001-5137-3796

**Глебов Лев Александрович** – аспирант кафедры «Процессы и машины обработки металлов давлением», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.  
Email: glebovla@susu.ru. ORCID 0000-0001-6484-1894

**Liudmila V. Radionova** – PhD (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Metallurgy Department, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia.  
Email: radionoalv@rambler.ru. ORCID 0000-0001-9587-2925

**Dmitriy V. Gromov** – postgraduate student of the Metallurgy Department, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia.  
Email: gromov111999@gmail.com. ORCID 0000-0001-6036-3784

**Sergey R. Faizov** – Junior Researcher of the Automation and Control Department, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia.  
Email: faizovsergey@gmail.com. ORCID 0000-0001-6644-1173

**Roman A. Lisovsky** – Programming Engineer of the Educational Technology and Equipment Research and Production Institute, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.  
Email: lisovskiira@susu.ru. ORCID 0000-0002-8857-2606

**Sergey E. Zaramenskikh** – Programming Engineer of the Educational Technology and Equipment Research and Production Institute, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.  
Email: s.zaramenskih@yandex.ru. ORCID 0000-0001-5137-3796

**Lev A. Glebov** – postgraduate student of the Department of Metal Forming Processes and Machines, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.  
Email: glebovla@susu.ru. ORCID 0000-0001-6484-1894

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

УДК 621.982.44

DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-3-71-80

**ПРАВКА ЛОКАЛЬНОГО УЧАСТКА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ  
ПЕРЕД ОБКАТКОЙ ГЛАДКИМИ ПЛИТАМИ**

Зайдес С.А., Буй М.З., Пономарев Б.Б.

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

**Аннотация.** Актуальность работы. Разнообразные нежесткие цилиндрические детали типа валов и осей используют при создании транспортных, сельскохозяйственных, землеройных и других машин. При изготовлении, ремонте, эксплуатации, а в некоторых случаях и при хранении такие детали меняют свою геометрическую форму и размеры, то есть искривляются. Проблемы, связанные с искривлением нежестких деталей, возникают уже на этапе их изготовления. Поэтому на практике применяют неоднократные операции правки для достижения правильной геометрической формы деталей машин. В Иркутском НИТУ разработан способ правки и упрочнения нежестких деталей, основанный на поперечной обкатке гладкими плитами. Однако для реализации этого способа правки необходимо сначала выправить небольшой центральный участок заготовки, при этом сохраняя форму ее поперечного сечения. **Цель работы.** Определить напряженно-деформированное состояние на ограниченном участке цилиндрической заготовки для определения качества правки, параметров процесса и геометрического искажения поперечного сечения заготовки. **Используемый метод.** С помощью программного обеспечения для 3D-проектирования (Solid work 2019) и вычислительного моделирования (Ansys workbench 19.2) построена модель процесса деформирования центральной части заготовки перед правкой и выполнен расчет величины радиальной силы, необходимой для выправления искривленной заготовки на локальном участке. **Результаты.** На основе анализа результатов конечно-элементного моделирования установлена величина радиальной силы, равная 600 Н, для выправления цилиндрической заготовки из стали 3 диаметром  $D = 10$  мм, длиной  $l = 200$  мм с исходным прогибом  $f_0 = 0,5$  мм на центральном участке шириной 20 мм. При таком значении радиальной силы не нарушается геометрическая форма поперечного сечения заготовки и максимальное значение напряжений в поперечном сечении меньше предела текучести материала, что обеспечивает процесс дальнейшей ее обкатки между гладкими плитами.

**Ключевые слова:** радиальная сила, искривленный вал, прогиб, степень относительного обжатия, напряженно-деформированное состояние, интенсивность напряжений, упругопластическая деформация, правка, плоские плиты

© Зайдес С.А., Буй М.З., Пономарев Б.Б., 2024

**Для цитирования**

Зайдес С.А., Буй М.З., Пономарев Б.Б. Правка локального участка цилиндрических деталей перед обкаткой гладкими плитами // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №3. С. 71-80. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-71-80>



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

# STRAIGHTENING A LOCAL AREA OF CYLINDRICAL PARTS BEFORE ROLLING WITH SMOOTH PLATES

Zaides S.A., Bui M.D., Ponomarev B.B.

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

**Abstract. Relevance.** A variety of non-rigid cylindrical parts such as shafts and axles are used to manufacture transport, agricultural, earth-moving and other machines. Manufacturing, repair, operation, and in some cases storage of such parts result in changes in their geometric shape and dimensions, that is, they become bent. Problems associated with bending of non-rigid parts arise already at the stage of their manufacturing. Therefore, in practice, repeated straightening operations are used to achieve the correct geometric shape of machine parts. Irkutsk National Research Technical University developed a method for straightening and strengthening non-rigid parts based on transverse rolling with smooth plates. However, to implement this straightening method, at first it is necessary to straighten a small central section of the workpiece, while maintaining the shape of its cross-section. **Objectives.** The research is aimed at determining the stress and strain state in a limited area of a cylindrical workpiece to assess the quality of straightening, process parameters and geometric distortion of the cross section of the workpiece. **Methods Applied.** Using 3D design software (Solidworks 2019) and computational modeling (Ansys Workbench 19.2), the authors built a model of the deformation process of the workpiece central part before straightening and calculated radial force to straighten the curved workpiece in a local area. **Results.** Having analyzed the results of finite element modeling, the authors established that radial force was 600 N for straightening a cylindrical workpiece made of steel 3 with diameter  $D$  of 10 mm, length  $l$  of 200 mm at initial deflection  $f_0$  of 0.5 mm in the central area, 20 mm wide. This value of radial force does not entail defects of the geometric shape of the workpiece cross section and the maximum value of stresses in the cross section is less than yield strength of the material, ensuring the process of its downstream rolling with smooth plates.

**Keywords:** radial force, curved shaft, deflection, percentage reduction, stress and strain state, stress intensity, elastoplastic deformation, straightening, smooth plates

## For citation

Zaides S.A., Bui M.D., Ponomarev B.B. Straightening a Local Area of Cylindrical Parts Before Rolling with Smooth Plates. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 3, pp. 71-80. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-71-80>

## Введение

В настоящее время нежесткие цилиндрические детали типа валов и осей составляют большую номенклатуру среди всех видов изделий, которые используются в авиационной, автомобильной, сельскохозяйственной, горнорудной и бытовой технике [1-3]. Во время эксплуатации, транспортирования, а также при хранении таких деталей происходит нарушение их геометрической формы и размеров ввиду внешнего механического и температурного воздействия, в результате которого нарушается работоспособность машин и механизмов. Особенно это касается нежестких деталей, у которых соотношение длины к диаметру превышает 10 и более раз. Как правило, вследствие искривления деталей максимальный прогиб может достигать 5-7 мм и более [4, 5].

Для восстановления геометрической формы цилиндрических деталей с большим прогибом традиционные способы правки исчерпали свои технологические возможности, так как при обработке нежестких цилиндрических деталей с малыми диаметрами (от 5 до 15 мм) обычно происходит нарушение прямолинейности ввиду воздействия одностороннего радиального давления [6, 7].

Не менее важной проблемой является механическая обработка нежестких деталей машин. В современном машиностроении достаточно эффективно применяют различные способы отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием (ППД) для получения благоприятного напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя деталей, а также для достижения более высокого качества изделий. Широкое применение данного метода обработки объясняется его техническими достоинствами (простотой реализации, сравнительно высокой производительностью, универсальностью, стойкостью и надежностью рабочего инструмента) [8, 9]. Но при упрочнении деталей малых размеров и малой жесткости тоже имеют место проблемы, связанные с сохранением их прямолинейной формы, поскольку радиальная внешняя нагрузка от деформирующего инструмента вызывает искривление изделий.

Таким образом, при механической обработке деталей малой жесткости возникают две важные проблемы: это правка деталей и их упрочнение. Одним из путей решения вышеизложенных проблем является восстановление формы искривленных цилиндри-



ческих деталей за счет создания уравновешенного равномерного радиального давления для формирования в поверхностном слое напряженного состояния, которое позволяет повысить и стабилизировать физико-механические свойства, а также эксплуатационные характеристики изделий машиностроения [4, 10, 11].

В Иркутском национальном исследовательском техническом университете разрабатываются новые способы для правки и упрочнения нежестких цилиндрических деталей типа валов и осей. Способ правки и упрочнения в одной технологической операции, техническая новизна которого подтверждена патентом РФ [12], предназначен в основном для обработки деталей из пластичных металлов и сплавов. Заготовки таких деталей имеют искривленную форму, причем в разных плоскостях, и выправлять их эффективно известными способами правки не представляется возможным.

Предлагаемый способ обработки основан на обкатке деталей гладкими плитами. Процесс включает в себя предварительное упругопластическое деформирование и правку с одновременной отделочно-упрочняющей обработкой поверхностным пластическим деформированием. Чтобы осуществить такой процесс, необходимо сначала выправить центральный участок заготовки для последующей ее обкатки гладкими плитами. Качество такой операции зависит от напряженного состояния в заготовке, которое должно обеспечить и процесс выправления искривленного участка, и минимальное искажение цилиндрической формы поперечного сечения самой заготовки, так как в противном случае обкатку невозможно будет реализовать, поскольку вместо процесса качения произойдет процесс скольжения между заготовкой и плитами [5, 7].

**Цель исследования** заключается в определении напряженно-деформированного состояния на ограниченном участке цилиндрической заготовки для определения качества правки, параметров процесса и геометрического искажения поперечного сечения заготовки. В работе рассмотрена методика правки локального участка цилиндрической детали с конкретными геометрическими и физико-механическими свойствами.

### Конечно-элементная модель процесса правки искривленных валов плоскими плитами

Схема процесса правки центральной части заготовки представлена на **рис. 1**. Заготовку 2 вогнутой стороной устанавливают на нижнюю плиту 3 шириной  $b$ . Величина максимального прогиба в центральном сечении заготовки относительно нижней плиты обозначена  $f_1$ . Этот прогиб в процессе правки необходимо устранить за счет приложения некоторой радиальной силы  $F$  к верхней плите, при этом цилиндрическая форма заготовки практически не должна измениться.

Для исследования напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя при упрочнении различными способами ППД и для определения максимальной интенсивности напряжений успешно применяется компьютерная программа моделирования, сущность которой заключается в использовании метода конечных элементов. Одной из известных и широко используемых программ, эффективно реализующих данный метод, является программа ANSYS [13, 14], которая и была использована в данной работе. Для проведения расчетов при статическом нагружении цилиндрической заготовки радиальной силой построена геометрическая модель для работы в программе ANSYS.

Характеристики образца: в качестве заготовки был использован цилиндр диаметром  $D = 10$  мм, длиной  $l = 200$  мм с исходным прогибом  $f_0 = 0,5$  мм, материал образца – сталь 3 – упругопластический, модуль упругости  $E = 1,8 \cdot 10^5$  МПа, коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3$ , диаграмма деформирования материала – билинейная (предел текучести  $\sigma_T = 255$  МПа, предел прочности  $\sigma_B = 490$  МПа, модуль упрочнения  $E_T = 1,45 \cdot 10^3$  МПа). В качестве материала, используемого для плоских плит, применена конструкционная сталь высокой прочности. При моделировании рабочий инструмент принят как абсолютно жесткое тело. Коэффициент трения скольжения в зоне контакта заготовки с плитами  $f = 0,1$ .

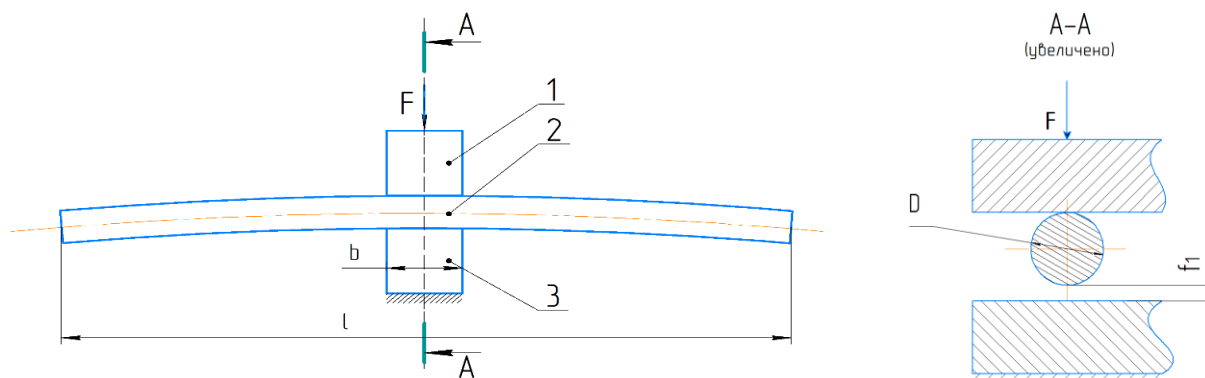


Рис. 1. Схема правки центрального участка искривленного вала гладкими плитами:

1 – верхняя плита; 2 – заготовка; 3 – нижняя плита

Fig. 1. Diagram of straightening the central section of a curved shaft with smooth plates:

1 is a top plate; 2 is a workpiece; 3 is a bottom plate

Для формирования конечно-элементной сетки при моделировании их формы были взяты из справочника использования программы ANSYS 19.1 с учетом механического взаимодействия заготовки из стали с абсолютно жестким телом (для заготовки использованы конечные элементы тетраэдрического типа, для двух плоских плит – прямоугольного типа). Сетка использовалась с постоянным размером (в нашем случае 0,5 мм) и одного типа по всему объему заготовки.

Для определения максимального прогиба  $f_1$  на участке контакта заготовки с нижней плитой использована формула, полученная по теореме Пифагора:

$$f_1 = R - \frac{1}{2} \sqrt{4R^2 - b^2}, \quad (1)$$

где  $b$  – ширина плоских плит, мм;  $R$  – радиус кривизны искривленного вала, мм.

Для указанных выше размеров заготовки и ширине плоских плит, равных 20 мм, максимальный прогиб на участке контакта заготовки с гладкими плитами составляет  $f_1 = 0,05$  мм.

После приложения к заготовке радиальной силы, которая направлена перпендикулярно к контактной площадке, ее поперечное сечение сместится вниз к нижней плите (см. рис. 1). Расстояние между плитами при этом станет меньше исходного диаметра цилиндра на величину абсолютного обжатия. Отношением величины абсолютного обжатия к первоначальному диаметру сечения заготовки представляет собой степень относительного обжатия  $Q$ , которая определяется по формуле [2, 11]

$$Q = \frac{D - d}{D} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где  $D$  – начальный диаметр заготовки, мм;  $d$  – высота поперечного сечения заготовки после приложения радиальной силы, мм.

Для оценки влияния степени относительного обжатия на напряженно-деформированное состояние заготовки к верхней плите были приложены различные значения радиальной силы и определены величины перемещения верхнего и нижнего контура центрального поперечного сечения заготовки с помощью программы моделирования ANSYS. Исходные значения радиальной силы для расчета определены в соответствии с условием [2, 4]

$$F < \frac{4I_x \sigma_T}{R}, \quad (3)$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести материала заготовки, МПа;  $I_x$  – момент инерции поперечного сечения заготовки, мм<sup>4</sup>;  $R$  – радиус поперечного сечения заготовки, мм.

Для заданных параметров заготовки определено предельное значение радиальной силы ( $F < 1100$  Н) для выправления ее центральной части.

На рис. 2 показана схема осадки искривленной заготовки между гладкими плитами. На рис. 2, а показано начальное положение центрального поперечного сечения заготовки, имеющей максимальный прогиб  $f_1 = 0,05$  мм. Вследствие кривизны заготовка опирается по краям нижней плиты, а в центральной части остается прогиб (зазор) величиной  $f_1$ . На рис. 2, б показана схема перемещения и деформации поперечного сечения заготовки под действием радиальной силы  $F$ . Плоскость касания верхней плиты (А) с заготовкой в процессе нагружения перемещается на некоторую величину  $x_1$ , а плоскость, проходящая через нижний контур поперечного сечения заготовки (Б), перемещается на величину  $x_2$ . Вследствие воздействия радиальной силы  $F$  заготовка деформируется и в зоне контакта с плитами сжимается на величины  $a_1$  и  $a_2$  (см. рис. 2, б). Если бы заготовка была изготовлена из абсолютно жесткого тела, то  $x_1 = x_2$ . Но в данном случае рассматриваются детали из пластичных материалов, поэтому  $x_1 \neq x_2$ . Задача исследования заключается в том, чтобы установить зависимость между этими перемещениями и найти оптимальную величину радиальной силы для устранения начального прогиба, при этом не нарушая геометрической формы поперечного сечения заготовки.

После воздействия радиальной силы диаметр заготовки становится меньше на величину абсолютного обжатия ( $D - d$ ), которая определяется в зависимости от перемещений  $x_1$  и  $x_2$  и прогиба  $f_1$  по формуле

$$D - d = x_1 + x_2 - 2 \cdot f_1. \quad (4)$$

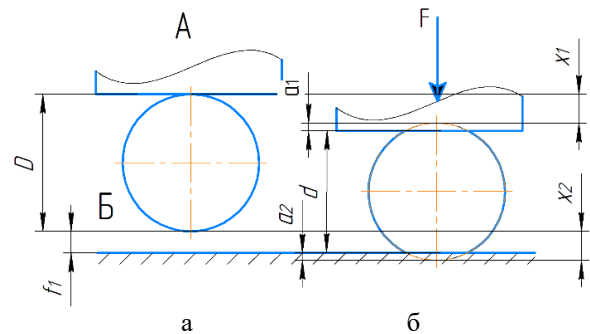


Рис. 2. Схема перемещения и деформации поперечного сечения заготовки при силовой осадке плоскими плитами: а – начальное положение поперечного сечения; б – положение поперечного сечения после приложения радиальной силы

Fig. 2. Diagram of movement and deformation of the cross section of the workpiece during loaded upsetting with flat plates: а is an initial position of the cross section; б is a position of the cross section after applying radial force

В табл. 1 представлены значения перемещений и деформаций центрального поперечного сечения заготовки после радиального воздействия плоских плит. Для исследования величины силы  $F$  в более широком диапазоне в программе ANSYS заданы ее значения от 400 до 1100 Н. На основе полученных результатов выполнен расчет величины абсолютного обжатия, а также степени относительного обжатия (см. табл. 1).

Таблица 1. Результаты деформаций и перемещений заготовки в зависимости от величины радиальной силы  $F$   
 Table 1. Results of deformation and movements of the workpiece depending on radial force  $F$

Величина радиальной силы $F$ , Н	Перемещение плоскости А заготовки $x_1$ , мм	Перемещение плоскости Б заготовки $x_2$ , мм	Величина абсолютного обжатия $D - d$ , мм	Степень относительного обжатия $Q$ , %
400	0,037	0,026	0	0
500	0,048	0,035	0	0
600	0,056	0,051	0,007	0,07
700	0,065	0,058	0,023	0,23
800	0,079	0,064	0,043	0,43
900	0,085	0,068	0,053	0,53
1000	0,097	0,07	0,067	0,67
1100	0,13	0,074	0,104	1,04

Из табл. 1 следует, что при радиальной силе, равной 600 Н, что соответствует абсолютному обжатию заготовки величиной 0,007 мм, удается устранить начальный прогиб  $f_1 = 0,05$  мм на центральном участке шириной  $b$ . Дальнейшее повышение радиальной силы от 650 до 1100 Н влияет уже на изменение формы (круга) заготовки, то есть происходит ее сжатие, что влияет на способность заготовки к дальнейшему перемещению между плитами.

На рис. 3 показаны зависимости перемещения касательных линий  $x_1$  и  $x_2$  к заготовке с плитами и степени относительного обжатия от величины радиальной силы. Анализируя рис. 3, можно сделать вывод о том, что с увеличением усилия от 400 до 1100 Н величины перемещений плавно возрастают. Расстояние между сечением заготовки и нижней плитой  $f_1$  исчезает при силе 600 Н и дальнейшее ее повышение приводит к деформации заготовки в зоне соприкосновения ее с плитами. Величина деформации в месте контакта заготовки с верхней плитой значительно увеличивается при радиальной силе более 1000 Н (см. табл. 1). Вследствие воздействия радиальной силы в зоне контакта плит с заготовкой создается интенсивность напряжений. Если величина этих напряжений превышает предел текучести материала заготовки в процессе обработки, то происходит значительное отклонение геометрической формы цилиндрических деталей [15].

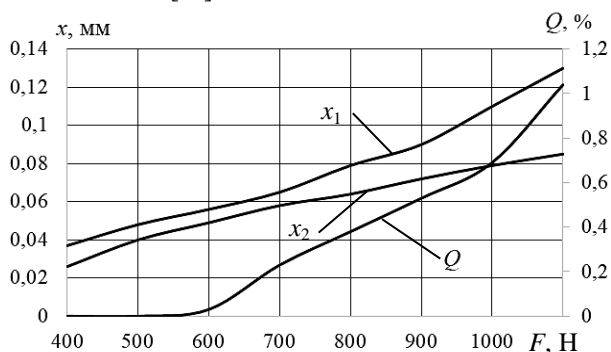


Рис. 3. Зависимости величины перемещений  $x_1$  и  $x_2$  и степени относительного обжатия от величины радиальной силы  $F$

Fig. 3. Dependences between displacements  $x_1$  and  $x_2$  and percentage reduction, and radial force  $F$

### Влияние степени относительного обжатия на напряженное состояние заготовки

В теории и практике обработки металлов давлением известно, что радиальное воздействие на цилиндрическую заготовку, особенно при обкатке, может привести к формированию в осевой зоне тела значительных растягивающих напряжений, которые вызывают повреждения материала [16].

Для оценки напряженного состояния в разных точках цилиндрических образцов определена интенсивность напряжений по Мизесу (von – Mises) и компоненты напряжений по осям  $O_z$  (осевые  $\sigma_z$ ),  $O_x$  (радиальные  $\sigma_r$ ),  $O_y$  (тангенциальные  $\sigma_\phi$ ). Временные напряжения возникают при непосредственном воздействии внешних сил от действия рабочего инструмента, и они оказывают влияние на энергосиловые характеристики процесса и глубину упрочненного слоя, давление в зоне деформации, а также оказывают влияние на прочность и износостойкость деформирующего инструмента. Напряженное состояние цилиндрической детали по Мизесу при использовании главных напряжений определяется по интенсивности напряжений  $\sigma_i$  [8, 17]:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [(\sigma_z - \sigma_\phi)^2 + (\sigma_\phi - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2]}. \quad (5)$$

На рис. 4 представлено влияние величины радиальной силы на интенсивность напряжений в цилиндрической заготовке.

Результаты моделирования показали (см. рис. 4), что при увеличении радиальной силы (соответственно, и степени относительного обжатия) интенсивность напряжения также увеличивается и достигает предела текучести (для исследуемого материала равно 255 МПа) при величине радиальной силы, приблизительно равной 1040 Н. Когда максимальный прогиб  $f_1$  в центральном сечении заготовки еще существует, то при постоянном увеличении радиальной силы значения напряжений плавно растут, и как только  $f_1$  исчезает (при  $F = 600$  Н), в это время заготовка деформируется с двух стороны и напряжения равномерно повышаются (см. рис. 4).

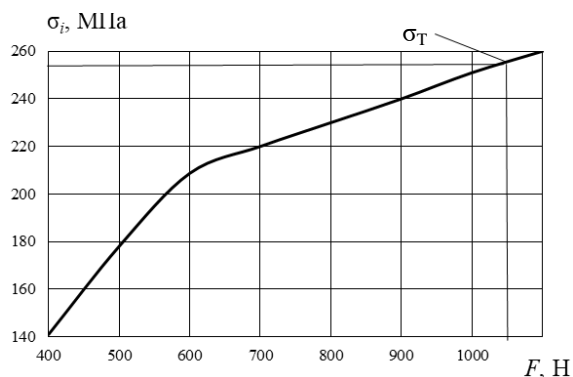


Рис. 4. Влияние величины радиальной силы  $F$  на интенсивность напряжений в цилиндрической заготовке

Fig. 4. The influence of radial force  $F$  on the stress intensity in a cylindrical workpiece

На рис. 5 представлено распределение полей интенсивности напряжений по центральному поперечному сечению заготовки при разных величинах радиальной силы. На рис. 5, а при  $F = 400$  Н (соответственно  $f_1 > 0$ ) максимальное напряжение возникает только в зоне контакта заготовки с верхней плитой. При  $F = 600$  Н заготовка входит в контакт с нижней плитой и напряжения в этой зоне начинают тоже формироваться. При дальнейшем увеличении радиальной силы напряжения растут и охватывают все сечение заготовки. При большом значении радиальной силы происходит не только рост напряжений, но и отклонение от круглости цилиндрических деталей [16].

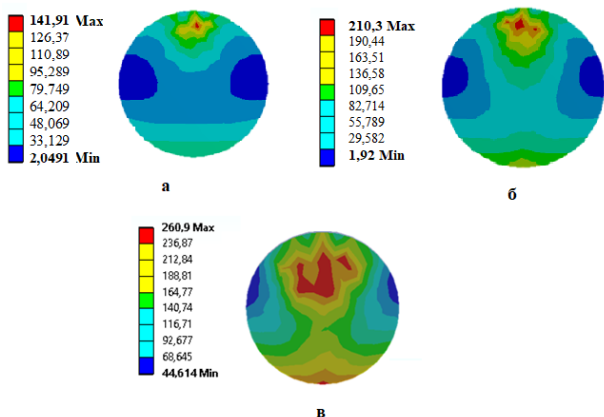


Рис. 5. Распределение полей интенсивности напряжений по поперечному сечению заготовки: а – при  $F = 400$  Н; б – при  $F = 600$  Н; в – при  $F = 1100$  Н

Fig. 5. Distribution of stress intensity fields over the cross section of the workpiece: а is at  $F = 400$  N; б is at  $F = 600$  N; в is at  $F = 1100$  N

На рис. 6 показано распределение интенсивности напряжений по длине заготовки при разных значениях радиальной силы. Очевидно, что при непосредственном воздействии радиальной силы на центральную часть искривлённого вала напряжения форми-

руются в основном в зоне контакта заготовки с плитами (рис. 6, а). После устранения максимального прогиба в центральном сечении при увеличении силы  $F$  до 1100 Н напряжения начинают неравномерно распределяться по длине заготовки и при этом максимальное значение в зоне центральной части превышает предел текучести исследуемого материала (рис. 6, б).

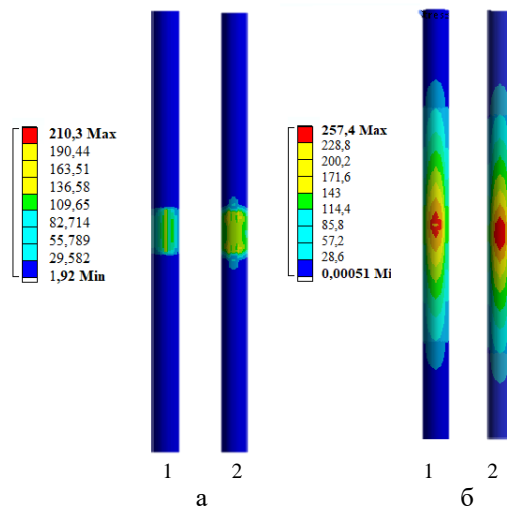


Рис. 6. Распределение интенсивности напряжения по длине заготовки: а – при  $F = 600$  Н; б – при  $F = 1100$  Н; 1 – вид сверху; 2 – вид снизу

Fig. 6. Distribution of stress intensity along the length of the workpiece: а is at  $F = 600$  N; б is at  $F = 1100$  N; 1 is a top view; 2 is a bottom view

На рис. 7 показано распределение главных компонент тензора временных напряжений вдоль радиуса поперечного сечения цилиндрического образца в процессе выправления центральной части искривленного вала при величине радиальной силы 600 Н. В результате моделирования установлено, что при значении силы, равной 600 Н, заготовка касается нижней плиты и радиальные, тангенциальные, осевые напряжения носят знакопеременный характер. В зоне контакта они сжимающие и максимальное их значение достигает в месте контакта заготовки с плитами. По мере приближения к центру они меняют свой знак и переходят в растягивающие.

Полученные результаты расчета временных напряжений подтверждают известный из практики факт, что при больших значениях радиальной силы в центральной зоне заготовки возможно разрыхление и разрушение материала [10, 18]. Следовательно, необходимо выбрать рациональные режимы для процесса правки валов гладкими плитами. Для получения рациональных растягивающих временных напряжений в центральной зоне цилиндра при сохранении благоприятных сжимающих напряжений на периферии необходимо использовать оптимальное значение силы деформации  $F$ , равное 600 Н.

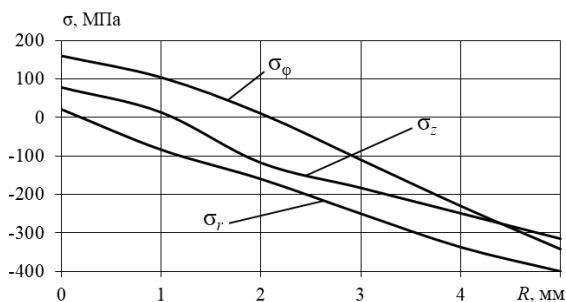


Рис. 7. Распределение компонент временных напряжений по радиусу цилиндра при величине радиальной силы 600 Н (в плоскости вертикального нагружения)  
 Fig. 7. Distribution of temporary stress components along the radius of the cylinder at 600 N (in the plane of vertical loading)

**Влияние величины радиальной силы на деформированное состояние заготовки**

На рис. 8 показана зависимость относительной упругой и пластической деформации  $\epsilon$  от величины приложенной радиальной силы  $F$ , а на рис. 9 показаны изополосы деформаций на поверхности заготовки в процессе выправления ее центральной части при устранении исходного максимального прогиба ( $F = 600$  Н).

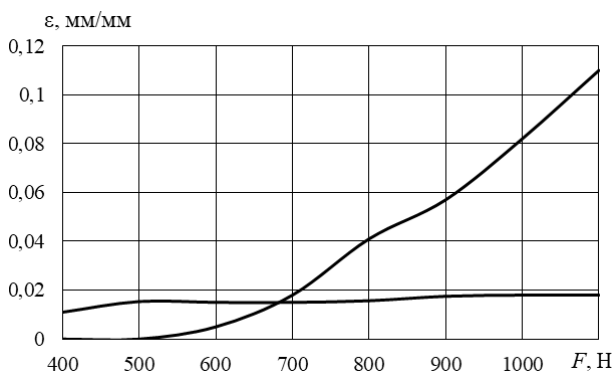


Рис. 8. Зависимость относительных деформаций от величины радиальной силы  $F$ :  
 1 – пластическая деформация;  
 2 – упругая деформация  
 Fig. 8. Dependence between relative deformation and radial force  $F$ : 1 is plastic deformation; 2 is elastic deformation

В результате моделирования установлено, что при действии на заготовку внешней радиальной силы она испытывает разные виды деформаций. При этом значения упругой деформации остаются практически неизменными с увеличением радиальной силы. Пластическая деформация возникает при определенной величине радиальной силы и далее с учетом ее роста она тоже растет (см. рис. 8). При этом зона пластической деформации возникает только в месте контакта детали с плоскими плитами,

а зона упругой деформации распределяется по всему участку шириной  $b$  (рис. 9).

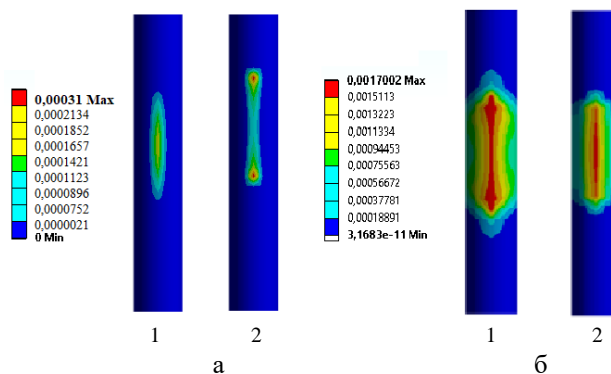


Рис. 9. Распределение изополос относительных деформаций по длине детали (при  $F = 600$  Н): а – зона пластической деформации; б – зона упругой деформации; 1 – вид сверху; 2 – вид снизу  
 Fig. 9. Distribution of isobands of relative deformation along the length of the part (at  $F = 600$  N): а is a zone of plastic deformation; б is a zone of elastic deformation; 1 is a top view; 2 is a bottom view

В результате компьютерного моделирования функции пластической деформации в программе ANSYS определена глубина упрочненных зон путем анализа очага распространения интенсивности деформации. Глубина пластической деформации характеризуется зоной, в которой интенсивность напряжений достигает предела текучести материала [10, 11].

Распределение изополос пластических деформаций по центральному поперечному сечению заготовки при воздействии на ее разных по величине радиальных сил представлено на рис. 10.

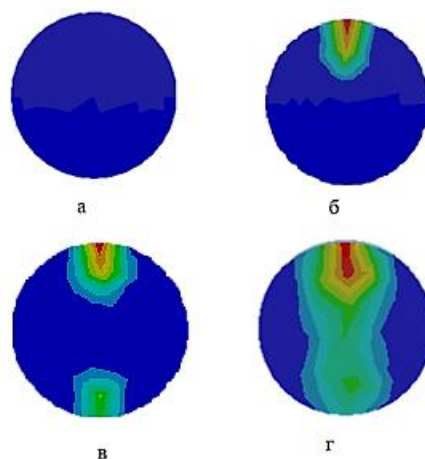


Рис. 10. Изополосы пластических деформаций при разных значениях радиальной силы  $F$ : а –  $F = 400$  Н; б –  $F = 600$  Н; в –  $F = 800$  Н; г –  $F = 1100$  Н  
 Fig. 10. Isobands of plastic deformation for different values of radial force  $F$ : а is  $F = 400$  N; б is  $F = 600$  N; в is  $F = 800$  N; г is  $F = 1100$  N

Из рис. 10 следует что, зона пластической деформации повышается с увеличением значения радиальной силы, приложенной к верхней плите. При небольшой величине радиальной силы центральная часть заготовки не выпрямляется и в сечении не наблюдается пластической деформации (рис. 10, а). Как только заготовка коснется нижней плиты, пластическая деформация появляется в зоне контакта с верхней плитой (рис. 10, б). Далее с увеличением радиальной силы повышается и, соответственно, расширяется зона пластической деформации (см. рис. 10, в) и достигает центра поперечного сечения цилиндра (рис. 10, г).

Таким образом, в работе представлена методика выбора параметров правки цилиндрической детали на локальном участке. Для конкретной детали определены условия деформирования, обеспечивающие ее выправление без существенного искажения формы поперечного сечения. Способ правки гладкими плитами можно рекомендовать для деталей из пластичных материалов диаметром от 5 до 20 мм и длиной до 500 мм.

### Заключение

Таким образом, результаты статического моделирования процесса выправления центральной части искривленной заготовки перед правкой ее плоскими плитами позволяет сделать следующие выводы:

1. При воздействии радиальной силы на центральном участке искривленной заготовки наблюдается устранение максимального исходного прогиба. С увеличением радиальной силы соответственно увеличивается степень относительного обжатия и значение начального прогиба уменьшается. Выпрямление центральной части позволяет в дальнейшем обкатывать заготовку между плитами в процессе правки.

2. Установлено значение радиальной силы  $F$ , равное 600 Н, для предварительного деформирования центральной части цилиндрической заготовки, изготовленной из стали 3, диаметром  $D = 10$  мм, длиной  $l = 200$  мм с исходным прогибом  $f_0 = 0,5$  мм на центральном участке шириной 20 мм. При величине этой силы не нарушается геометрическая форма поперечного сечения заготовки и максимальное значение напряжений, возникающих в зоне контакта заготовки с плитами, не превышает предела текучести материала.

### Список источников

1. Иванов В.П., Кастрюк А.П. Основные направления ресурсосбережения в ремонтном производстве // Труды ГОСНИТИ: Техническое обслуживание, ремонт. М.: ГОСНИТИ, 2013. Т. 112. Ч. 2. С. 15-18.
2. Блюменштейн В.Ю., Смелянский В.М. Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин. М.: Машиностроение, 2007. 399 с.
3. Бабичев А.П., Мотренко П.Д. Виброударная отделочно-упрочняющая обработка деталей нетрадиционных форм и размеров наукоемких изделий (на

примере силовых деталей вертолета) // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2021. №1. С. 38-43.

4. Бубнов А.С. Технологические возможности процесса правки маложестких цилиндрических деталей стесненным сжатием // Вестник ИрГТУ. 2006. №4. С. 68-75.
5. Клушин В.А., Рудович А.О. Технология и оборудование поперечно-клиновой прокатки: монография. Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2020. 300 с.
6. Повышение точности ориентации валов с дефектами поверхности при их правке на прессах / И.И. Манило, С.Г. Тютрин, А.А. Городских и др. // Инновации и исследования в транспортном комплексе: материалы Первой междунар. научн.-практ. конф. Курган: Российская транспортная академия, 2013. С. 86-87.
7. Королев А.В., Решетников М.К., Савран С.А. Конструктивные и технологические решения реализации способа правки и механической стабилизации длинномерных цилиндрических деталей // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2018. №7 (85). С. 9-16.
8. Зайдес С.А., Емельянов В.Н. Влияние поверхностного пластического деформирования на качество валов: монография. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2017. 380 с.
9. Попова В.В. Поверхностное пластическое деформирование и физико-химическая обработка. Рубцовск: Рубцовский индустриальный институт, 2013. 98 с.
10. Особенности формирования глубины упрочнения при обработке деталей поверхностным пластическим деформированием / Отений Я.Н., Привалов Н.И., Щеголев Н.Г., Муравьев О.П., Ткачева Ю.О. // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2019. №12-3. С. 452-455.
11. Сулов А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2019. 320 с.
12. Зайдес С.А., Лэ Х.К. Способ правки маложестких цилиндрических деталей. Патент на изобретение RU 2685826 C1, 23.04.2019. Заявка № 2018117414 от 10.05.2018. Бюл. №12.
13. Басов К.А. ANSYS в примерах и задачах / под общ. ред. Д.Г. Красковского. М.: Компьютер Пресс, 2002. 224 с.
14. Study of the oil geopermeation patterns: A case study of ANSYS CFX software application for computer modeling / Iryna Ablieieva, Leonid Plyatsuk, Ihor Roi, Oleh Chekh, Sabina Gabbassova, Kseniia Zaitseva, Serhii Lutsenko // Journal of Environmental Management. 2021, vol. 287, 112347. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112347>.
15. Мураткин Г.В., Катова И.В. Математическая модель процесса правки деталей методом поверхностного пластического деформирования с предварительным изгибом заготовки // Обработка металлов давлением. 2022. №6. С. 27-31.

16. Зайдес С.А., Хо М.К. Определение напряженно-деформированного состояния цилиндрических деталей при круговой осцилляции секторального рабочего инструмента // Упрочняющие технологии и покрытия. 2022. Т. 18. №1 (205). С. 6-13.
  17. Приходько В.М., Петрова Л.Г., Чудина О.В. Металлофизические основы разработки упрочняющих технологий. М.: Машиностроение, 2003. 384 с.
  18. Зайдес С.А., Нгуен Х.Х. Интенсификация напряженного состояния в очаге деформации при локальном воздействии деформирующего инструмента // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. №4. С. 580-592.
- References**
1. Ivanov V.P., Kastruyk A.P. Key areas of resource saving in repair. *Trudy GOSNITI: Tekhnicheskoe obsluzhivanie, remont* [Transactions of GOSNITI: Maintenance, Repair]. Moscow: GOSNITI (State Research and Development Technological Institute), 2013, vol. 112, part 2, pp. 15-18. (In Russ.)
  2. Blyumenshteyn V.Yu., Smelyanskiy V.M. *Mekhanika tekhnologicheskogo nasledovaniya na stadiyakh obrabotki i ekspluatatsii detaley mashin* [Mechanics of technological inheritance at stages of machining and operation of machine parts]. Moscow: Mashinostroenie, 2007, 399 p. (In Russ.)
  3. Babichev A.P., Motrenko P.D. Vibratory impact finishing and strengthening treatment of parts of non-conventional shapes and sizes of science-intensive parts (using the example of helicopter strength parts). *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroyenii* [Science-Intensive Technologies in Mechanical Engineering]. 2021;(1):38-43. (In Russ.)
  4. Bubnov A.S. Technological capabilities of the strengthening process of low-rigidity cylindrical parts with constrained reduction. *Vestnik IrGTU* [Vestnik of Irkutsk State Technical University]. 2006;(4):68-75. (In Russ.)
  5. Klushin V.A., Rudovich A.O. *Tekhnologiya i oborudovanie poperechno-klinovoy prokatki: monografiya* [Technology and equipment for cross-wedge rolling: monograph]. Minsk: Institute of Physics and Technology, National Academy of Sciences of Belarus, 2020, 300 p. (In Russ.)
  6. Manilo I.I., Tyutrin S.G., Gorodskikh A.A. et al. Increasing accuracy of orientation of shafts with surface defects during their leveling with dies. *Innovatsii i issledovaniya v transportnom komplekse: materialy Pervoy mezhdunar. nauchn.-prakt. konf.* [Innovations and studies in the transportation complex: proceedings of the 1<sup>st</sup> International Scientific and Practical Conference]. Kurgan: Russian Transport Academy, 2013, pp. 86-87. (In Russ.)
  7. Korolev A.V., Reshetnikov M.K., Savran S.A. Design and technological solutions for applying a method of leveling and mechanical stabilization of long cylindrical parts. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroyenii* [Science-Intensive Technologies in Mechanical Engineering]. 2018;(7(85)):9-16. (In Russ.)
  8. Zaides S.A., Emelyanov V.N. *Vliyanie poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya na kachestvo valov: monografiya* [Influence of surface plastic deformation on the quality of shafts: monograph]. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University, 2017, 380 p. (In Russ.)
  9. Popova V.V. *Poverkhnostnoe plasticheskoe deformirovanie i fiziko-khimicheskaya obrabotka* [Surface plastic deformation and physical and chemical treatment]. Rubtsovsk: Rubtsovsk Industrial Institute, 2013, 98 p. (In Russ.)
  10. Oteniy Ya.N., Privalov N.I., Shchegolev N.G., Muravev O.P., Tkacheva Yu.O. Features of forming strengthening depth during surface plastic deformation of parts. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy* [International Journal of Applied and Basic Research]. 2019;(12-3):452-455. (In Russ.)
  11. Suslov A. G. *Kachestvo poverkhnostnogo sloya detaley mashin* [Quality of the surface layer of machine parts]. Moscow: Mashinostroenie, 2019, 320 p. (In Russ.)
  12. Zaides S.A., Le Kh.K. *Sposob pravki malozhestkikh tsilindricheskikh detaley* [Method for straightening low-rigid cylindrical parts]. Patent RU, no. 2685826, 2019.
  13. Basov K.A. *ANSYS v primerakh i zadachakh* [ANSYS examples and tutorials]. Ed. by Kraskovsky D.G. Moscow: Computer Press, 2002, 224 p. (In Russ.)
  14. Iryna Ablicieva, Leonid Plyatsuk, Ihor Roi, Oleh Chekh, Sabina Gabbassova, Kseniia Zaitseva, Serhii Lutsenko. Study of the oil geopermeation patterns: A case study of ANSYS CFX software application for computer modeling. *Journal of Environmental Management*. 2021;287:Article ID 112347. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112347>
  15. Muratkin G.V., Katova I.V. A mathematical model of a part straightening process by a surface plastic deformation method with preliminary bending of workpieces. *Obrabotka metallov davleniem* [Metal Forming]. 2022;(6):27-31. (In Russ.)
  16. Zaides S.A., Ho M.Q. Determining a stress and strain state of cylindrical parts during circular oscillation of a sectorial working tool. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [Strengthening Technologies and Coatings]. 2022;18(1(205)):6-13. (In Russ.)
  17. Prikhodko V.M., Petrova L.G., Chudina O.V. *Metallofizicheskie osnovy razrabotki uprochnyayushchikh tekhnologiy* [Metal physics of developing strengthening technologies]. Moscow: Mashinostroenie, 2003, 384 p. (In Russ.)
  18. Zaides S.A., Nguyen H.H. Intensifying the stress state in the deformation zone at local impact of a deforming tool. *iPolytech Journal*. 2022;26(4):580-592. (In Russ.)

Поступила 12.03.2024; принята к публикации 09.04.2024; опубликована 30.09.2024  
Submitted 12/03/2024; revised 09/0046/2024; published 30/09/2024

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

**Буй Мань Зунг** – аспирант,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия.  
Email: manhdungbuik52@gmail.com. ORCID 0009-0003-6390-105X

**Пономарев Борис Борисович** – доктор технических наук, профессор,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия.  
Email: pusw@istu.edu ORCID 0000-0003-1185-8638

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

**Bui Manh Dung** – postgraduate student,  
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.  
Email: manhdungbuik52@gmail.com. ORCID 0009-0003-6390-105X

**Boris B. Ponomarev** – DrSc (Eng.), Professor,  
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.  
Email: pusw@istu.edu ORCID 0000-0003-1185-8638





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

УДК 621.9.04

DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-3-81-91

## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ВНУТРЕННИХ ЦИКЛОИДАЛЬНЫХ ВИНТОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Альбов М.А., Акулиничев П.Д., Гончаров А.А.

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

**Аннотация.** В статье проводится анализ существующих методов изготовления внутренних циклоидальных винтовых отверстий. Задача является актуальной, так как внутренние циклоидальные винтовые поверхности встречаются в деталях объёмных одновинтовых машин, которые все чаще применяются в различных отраслях промышленности. Область применения одновинтовых машин зависит от типа применяемой винтовой пары, содержащей металлический ротор и полимерную обойму. Именно свойства материала, а значит, и способ получения винтовой обоймы определяет эксплуатационные характеристики одновинтовой машины, поэтому данные о технологических возможностях тех или иных методов получения циклоидальных винтовых отверстий могут быть полезны не только технологам, но и конструкторам, занимающимся разработкой новых, прогрессивных машин. В качестве материалов для изучения методов формообразования внутренних циклоидальных винтовых поверхностей послужили открытые информационные источники, а также опыт производителей одновинтовых машин. Методы исследования, применяющиеся в статье, – сбор, изучение и сравнительный анализ информации. Среди разнообразия методов получения внутренних сложнопрофильных поверхностей были представлены только те, что, по мнению автора, могут быть промышленно применены для формообразования внутренних циклоидальных винтовых поверхностей. Были проанализированы технологические возможности различных методов и сведены в таблицу применимости того или иного метода. Исследование показало, что существующие подходы изготовления внутренних циклоидальных винтовых поверхностей не перекрывают всех потребностей современной промышленности к обеспечению качества и габаритных характеристик существующих одновинтовых машин. В частности, на данный момент не существует метода формообразования высокоточной мелко-размерной внутренней циклоидальной винтовой поверхности из доступных химически стойких материалов. В статье приводятся предпосылки, способствующие разработке уникального метода, который позволит изготавливать поверхности такого рода с применением современных и доступных химически стойких материалов.

**Ключевые слова:** циклоидальная винтовая поверхность, формообразование, технология изготовления, точность, одновинтовой насос, героторная пара, технологические возможности

© Альбов М.А., Акулиничев П.Д., Гончаров А.А., 2024

### Для цитирования

Альбов М.А., Акулиничев П.Д., Гончаров А.А. Современные методы получения внутренних циклоидальных винтовых поверхностей // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №3. С. 81-91. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-81-91>



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

## MODERN METHODS FOR PRODUCING INTERNAL CYCLOIDAL HELICAL SURFACES

Albov M.A., Akulinichev P.D., Goncharov A.A.

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

**Abstract.** The article analyzes the existing methods for producing internal cycloidal screw holes. The task is currently relevant, since internal cycloidal screw surfaces are found in parts of volumetric single-screw machines, which are increasingly used in various industries. The scope of application of single-screw machines depends on the type of screw pair used, containing a metal rotor and a polymer cage. It is the properties of the material, and, consequently, the method of producing a screw cage that determines the operational characteristics of a single-screw machine, therefore, data on the technological capabilities of certain methods for producing cycloidal screw holes can be useful not only to technologists, but also to designers involved in the development of new, progressive machines. Open information sources, as well as the experience of single-screw machine manufacturers, served as materials for studying the methods of shaping internal cycloidal screw surfaces. The research methods used in the article are a collection, study and a comparative analysis of information. The variety of methods for producing internal composite surfaces included only those that could be industrially used for shaping internal cycloidal screw surfaces, according to the author's opinion. The authors analyzed technological capabilities of various methods and summarized in a table applicability of a particular method. The study showed that the existing approaches to producing internal cycloidal screw surfaces did not cover all the needs of the modern industry to ensure the quality and overall dimension characteristics of existing single-screw machines. In particular, now there is no method for forming a high-precision small-sized inner cycloidal screw surface from available chemically resistant materials. The article presents the prerequisites for developing a unique method to produce surfaces of this kind using modern and affordable chemically resistant materials.

**Keywords:** cycloidal screw surface, shaping, manufacturing technology, accuracy, single-screw pump, gerotor pair, technological capabilities.

### For citation

Albov M.A., Akulinichev P.D., Goncharov A.A. Modern Methods for Producing Internal Cycloidal Helical Surfaces. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 3, pp. 81-91. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-81-91>

### Введение

В современной промышленности существуют и активно развиваются объёмные одновинтовые машины [1-3]. Главным рабочим органом таких устройств является героторная или одновинтовая пара, состоящая из сложнопрофильного металлического ротора и, как правило, эластомерной обоймы с внутренней циклоидальной винтовой поверхностью (ЦВП) (рис. 1).

Область применения одновинтовых насосов постоянно расширяется, вследствие чего номенклатура материалов для изготовления обойм также увеличивается. Так, для применений в пищевой промышленности обоймы должны обладать инертностью по отношению к перекачиваемым веществам, поэтому в

этой отрасли применяются бессажевые бутадиен-нитрильный каучук (NBR) или этиленпропилендиеновый каучук (EPDM). В сфере строительства при применении героторных пар в одновинтовых дренажных насосах и штукатурных станциях наиболее критичным фактором при перекачивании рабочих жидкостей является наличие в них абразивных частиц, поэтому в данной сфере применяются полиуретаны (PU), обладающие высокой абразивной износостойкостью. В одновинтовых насосах для нефтедобывающей промышленности в обоймах применяют фторкаучук (ФКМ), который химически не разрушается при длительном контакте с нефтепродуктами.



Рис. 1. Одновинтовая пара: 1 – ротор; 2 – корпус обоймы; 3 – эластомерный слой обоймы; 4 – внутренняя циклоидальная винтовая поверхность

Fig. 1. Gerotor pair: 1 is a rotor; 2 is a cage body; 3 is an elastomer layer of the cage; 4 is an internal cycloidal helical surface

В некоторых отраслях промышленности, таких как фармацевтика и химическая отрасль, предъявляются уникальные требования к химической стойкости рабочих органов, соприкасающихся с перекачиваемой средой [4, 5]. В этой сфере для изготовления обойм применяется перфторированный каучук (ФФКМ). Однако стоимость этого материала в 150 раз превышает стоимость традиционно применяющегося фторкаучука (ФКМ), что оказывает значительное влияние на стоимость конечного изделия.

Конструкция обоймы одновинтового насоса, как правило, состоит из двух частей – это жёсткий корпус обоймы и упругая внутренняя часть с отверстием в виде ЦВП. Зачастую корпус одновинтовой обоймы изготавливают цилиндрическим, но для обеспечения высоких величин напора и равномерного натяга в одновинтовой паре применяются корпуса обойм, повторяющие внутреннюю ЦВП эластомерного слоя обоймы [6]. Например, немецкая компания «Knauф PFT» делает корпус винтовой обоймы с внутренней ЦВП (рис. 2), что при больших габаритах обоймы даёт экономию материала по сравнению с традиционной цилиндрической формой корпуса.



Рис. 2. Сложнопрофильный металлический корпус обоймы штукатурной станции

Fig. 2. Geometrically complex metal casing of the plaster station cage

Таким образом, на сегодняшний день существует множество методов изготовления таких изделий, но развитие насосных систем вызывает потребность в новых методах формообразования внутренней ЦВП для эластомерного слоя из современных материалов с повышенной химической стойкостью и абразивоустойчивостью для расширения области применения данного типа оборудования и снижения его конечной стоимости для потребителя. А также существует потребность в изготовлении внутренней ЦВП в конструкционных материалах, таких как металлы и пластики. Поэтому будут рассмотрены методы получения внутренних ЦВП не только в эластомерах, но и в жестких материалах, таких как металлы и пластики.

## Материалы и методы исследования

В качестве материалов для изучения методов формообразования внутренних циклоидальных винтовых поверхностей послужили открытые информационные источники, а также опыт производителей одновинтовых машин. Методы исследования, применяющиеся в статье, – сбор, изучение и сравнительный анализ информации.

## Полученные результаты и их обсуждение

Рассмотрим существующие в настоящий момент методы формирования внутренней циклоидальной винтовой поверхности.

Наиболее простым и универсальным методом получения внутренней ЦВП является **литьё в форму** [7]. Метод литья применим для изготовления обойм одновинтовых машин из жидкотекучих материалов, таких как полиуретаны или композиты на их основе. При таком методе в качестве опалубки выступает металлический корпус обоймы 1 (рис. 3), в который устанавливается литьевой стержень 2, формирующий внутреннюю циклоидальную винтовую поверхность за счет переноса профиля винтового стержня на поверхность получаемой детали. Благодаря этому можно добиться высокого качества поверхностного слоя и точности геометрии порядка 0,04-0,2 мм, где точность определяется усадкой литейного материала и точностью изготовления литейного стержня. Данный метод широко распространен при изготовлении обойм одновинтовых машин, применяемых в строительстве. Получаемые габариты изделий ограничены размерами литейного стержня с ЦВП, который в виду геометрических соотношений не может быть обработан при очень малом размере. Производители одновинтовых машин изготавливают данным методом обоймы со следующими размерами: минимальная высота обоймы 100 мм, диаметр 10 мм, а максимальные габариты ограничиваются целесообразной точностью формы, зависящей от усадки материала при литье.

Также с помощью различных методов литья, таких как литьё по выплавляемым моделям, литьё в песчано-глинистые формы, можно изготавливать корпуса обойм из литейных металлов и пластиков. Сложность изготовления в данном случае представляет литейный стержень с ЦВП, который должен быть разрушаемый, так как извлечь его из твердого тела не представляется возможным.

Другим наиболее распространенным методом получения внутренней ЦВП эластомерного слоя обоймы является **прессование в форму** [8] (рис. 4). Широкое распространение прессование получило благодаря применению доступного эластомерного материала – каучука, имеющего высокую химическую стойкость ко многим материалам. Метод заключается в запрессовывании пуансоном 7 подогретого каучука 5 в полость корпуса обоймы 1, где винтовой стержень с ЦВП 2 формирует профиль внутренней сложнопрофильной

поверхности. Далее при определенной температуре проводят вулканизацию каучука и последующее выбивание винтового стержня с ЦВП. Этот способ схож с литьём, но в отличие от него применяется для более вязких материалов, поэтому габариты получаемых изделий и точность формы, так же как и при литье, ограничены литейным стержнем и усадкой материала, которая для каучуков зачастую выше, чем для заливочных компаундов и составляет порядка 0,1-0,3 мм.

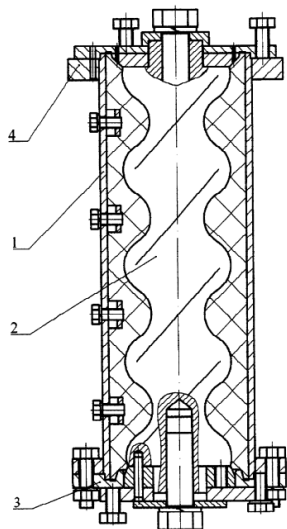


Рис. 3. Общий вид литейной формы: 1 – корпус; 2 – литейный стержень; 3 – нижний фланец с выпорами; 4 – верхний фланец  
 Fig. 3. General view of the casting mold: 1 is a body; 2 is a casting core; 3 is a lower flange with projections; 4 is an upper flange

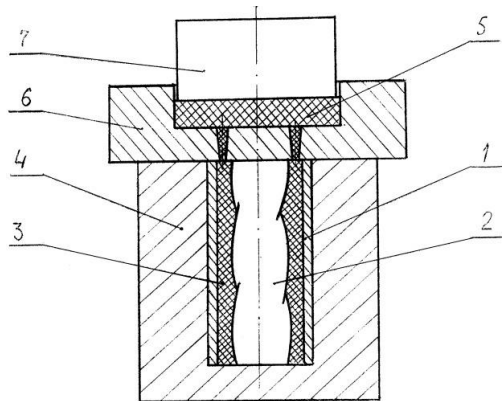


Рис. 4. Общий вид формы для прессования: 1 – корпус обоймы; 2 – винтовой стержень с ЦВП; 3 – эластомерный слой; 4 – пресс-форма; 5 – эластомер; 6 – загрузочная камера; 7 – пуансон  
 Fig. 4. General view of the pressing mold: 1 is a cage body; 2 is a screw rod with the cycloidal helical surface; 3 is an elastomeric layer; 4 is a mold; 5 is elastomer; 6 is a loading chamber; 7 is a punch

Как методы литья, так и методы прессования требуют изготовления сложнопрофильного стержня с циклоидальной винтовой поверхностью, относящейся к тому же классу поверхностей, что и ротор одновинтовых машин. Такие наружные сложнопрофильные детали в основном изготавливают из металлов прогрессивными лезвийными методами [9]. Для достижения высокого качества поверхностного слоя применяются методы галтовки или поверхностного пластического деформирования [10, 11].

К перспективным методам, не получившим широкого распространения, можно отнести **эксцентриковое сверление**. Данная технология изготовления внутренних винтовых поверхностей известна с 90-х годов прошлого века, однако не получила широкого распространения. Для осуществления этого метода необходима высокая технологическая база в виде дорогостоящего узконаправленного оборудования и профилирующего инструмента. Формирование циклоидальной винтовой поверхности обоймы 2 происходит за счет копирования профилирующей режущей кромки инструмента 1 на поверхность заготовки, где частоты вращения привода инструмента 4 и заготовки 3 находятся в определенной кинематической зависимости, обеспечивающейся синхронизирующим приводом 5, причем оси вращения инструмента и заготовки смещены на эксцентриситет винтовой поверхности  $e$  (рис. 5).

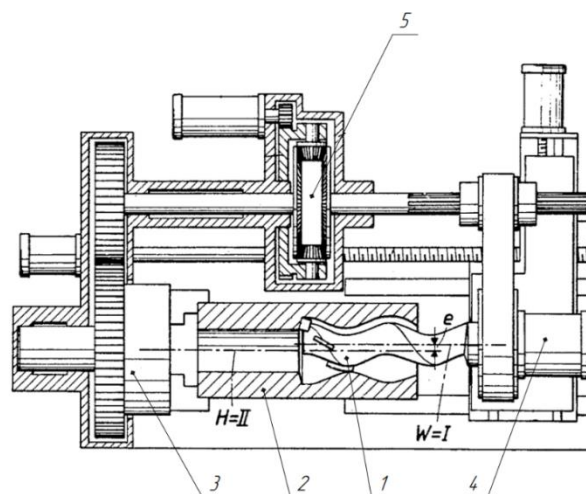


Рис. 5. Эксцентриковое сверление: 1 – профилирующий инструмент; 2 – обойма-заготовка; 3 – привод заготовки; 4 – привод инструмента; 5 – синхронизирующий привод;  $H$  – ось вращения заготовки;  $W$  – ось вращения инструмента;  $e$  – эксцентриситет вращения инструмента и заготовки  
 Fig. 5. Eccentric drilling: 1 is a profiling tool; 2 is a workpiece cage; 3 is a workpiece drive; 4 is a tool drive; 5 is a synchronizing drive;  $H$  is a workpiece rotation axis;  $W$  is a tool rotation axis;  $e$  is rotation eccentricity of the tool and the workpiece

При эксцентриковом сверлении закрепление инструмента может быть консольным либо с поджатием «центра». В роли «центра» выступает базирующий элемент инструмента, опирающийся на отверстие в заготовке. При консольном закреплении инструмента для обеспечения необходимой жесткости соотношение диаметра к высоте обоймы получается большим, что лимитирует применение данной технологии при обработке металлов, но достаточно для обработки полимеров, например фторопласта. Предполагается, что при применении дополнительной опоры на внутреннее отверстие обоймы габариты получаемых деталей следующие: высота – от 200 до 1000 мм, диаметр – от 50 до 200 мм. Точность формы просверленных деталей может достигать 0,05-0,2 мм в зависимости от жесткости инструмента.

Самым современным методом получения внутренней ЦВП является **электрохимическая обработка (ЭХО)** [13]. Этот метод был разработан для обработки корпусов обойм винтовых забойных двигателей, используемых для добычи нефти. Для данных типов одновинтовых машин характерен высокий нагрев при работе в недрах земли, вследствие чего эластомерный слой быстро разрушается. Для увеличения теплоотвода из рабочей зоны винтовой пары эластомерный слой обоймы забойного двигателя должен быть тонким и равномерным по всей обойме, чтобы наиболее эффективно отводить тепло в корпус обоймы.

Сущность метода заключается в протягивании с планомерным закручиванием винтового электрода 2 по базирующему отверстию корпуса обоймы 1. Элементы электрода, не принимающие участие в обработке, покрываются изолирующим материалом 3, а подача электролита осуществляется по каналу 4 (рис. 6). Так как электрод непрерывно обрабатывает поверхность заготовки по всей площади, то точность обработанной поверхности выходит небольшая, порядка 0,15-0,4 мм.

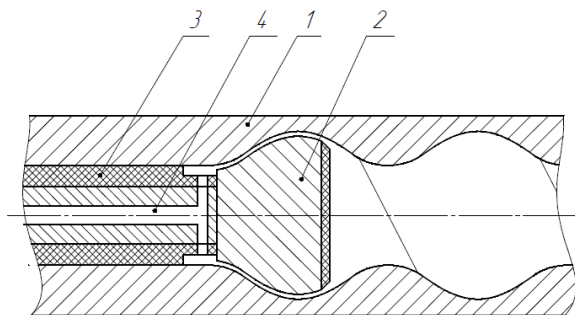


Рис. 6. Схема блока электрохимической обработки:

1 – корпус обоймы; 2 – циклоидальный винтовой электрод; 3 – изоляция; 4 – канал подачи электролита

Fig. 6. Diagram of the electrochemical processing unit: 1 is a cage body; 2 is a cycloidal screw electrode; 3 is insulation; 4 is an electrolyte supply channel

Следующий метод – это **фрезерование сферической фрезой** (рис. 7). Данная технология применяется компанией «Vert Technology» [14] для изготовления одновинтовых компрессоров конического типа, где необходим жесткий контакт между ротором и обоймой. Как следствие, эластомерного слоя у обоймы нет и контакт в героторной паре происходит между металлом ротора и металлом обоймы. Для обеспечения высокой производительности конических одновинтовых компрессоров необходимо изготавливать героторную пару с высокой точностью. Метод фрезерования сферической фрезой имеет сильные ограничения по диаметру и глубине винтовой поверхности в связи с низкой жесткостью инструмента, но для конической ЦВП это не так критично. Так, соотношение диаметра к высоте винтовой поверхности порядка 1 к 3.

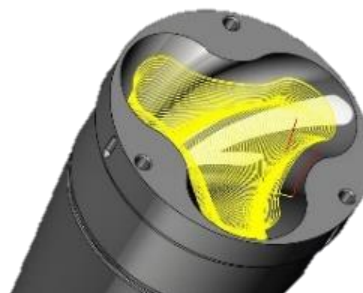


Рис. 7. Траектория движения инструмента при обработке внутренней ЦВП сферической фрезой

Fig. 7. Tool trajectory when machining an internal cycloidal helical surface with a spherical cutter

Данную стратегию обработки применяет только единственная компания, поэтому более точные сведения о данном методе не разглашаются. Современные САМ-системы не способны сгенерировать код управляющей программы для обработки внутренней ЦВП, удовлетворяющий требованиям к качеству таких поверхностей, поэтому производители винтовых объемных двигателей разрабатывают собственные уникальные технологические решения, направленные на подготовку управляющих программ для формообразования такого рода сложнопрофильных поверхностей, особенно внутренних.

Следующий метод – это **фрезерование дисковой фрезой**. При этом методе получения внутреннего винтового отверстия режущий инструмент – дисковая фреза 2 – совершает сложное вращательное движение относительно первичного и вторичного валов 3, 4 в специальной направляющей трубе 6, которая базируется по заранее точно обработанному отверстию в заготовке 1 (рис. 8). Из-за того, что инструмент базируется по заготовке, возможно обеспечение относительно высокой жесткости и тем самым есть возможность обрабатывать протяженные отверстия длиной до 2 м. Но в связи со сложной конструкцией оправки её узлы скольжения сильно лимитируют минимальный диаметр обработки, который начинается от 50 мм. Практической реализации данного метода найти

не удалось, поэтому метод ставится под сомнение с точки зрения целесообразности его применения и осуществления.

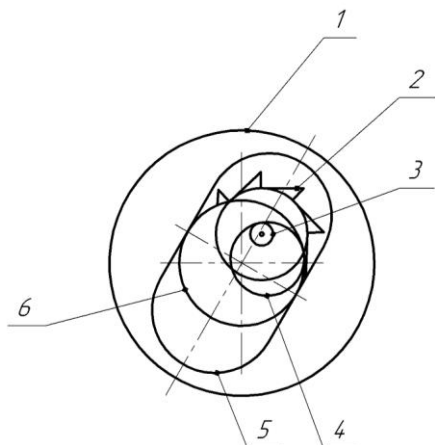


Рис. 8. Фрезерование дисковой фрезой:  
1 – заготовка-обойма; 2 – режущий инструмент;  
3 – первичный вал; 4 – вторичный вал (эксцентриковый вал); 5 – профиль винтового отверстия; 6 – направляющая труба

Fig. 8. Milling with a disc cutter:  
1 is a workpiece cage; 2 is a cutting tool;  
3 is an input shaft; 4 is a secondary shaft (eccentric shaft); 5 is a screw hole profile;  
6 is a guide pipe

К методам, применимым только для формирования корпуса обоймы, можно отнести **гидроформовку** [16]. Сущность метода заключается в формировании внутренней циклоидальной винтовой поверхности путем сдавливания тонкостенной металлической оболочки 3 на формирующий винтовой стержень 2 высоким давлением жидкости, поэтому точность полученной поверхности низкая, порядка 1-5 мм. К преимуществам такого метода можно отнести простоту изготовления формы (рис. 9) и производительность формирования винтовой поверхности. Однако гидроформовка применима только к пластичным материалам, причем заготовка должна обладать низкой жесткостью для её деформации давлением воды, поэтому получить мелкогабаритные детали не получится. Габариты винтовых поверхностей, полученных данным методом, начинаются от длины 400 мм и диаметра 50 мм, причем всегда остаются недеформированные края, которые нужно дополнительно обрабатывать.

Следующий метод формирования корпуса обоймы – это **прессование** [17]. Заготовка в виде трубы прессуется между сложнопольными матрицами, в связи с этим точность поверхности очень низкая, порядка 2-8 мм, причем на изделии образуется облой (рис. 10), который необходимо удалить. К преимуществам данного метода можно отнести высокую производительность метода, высокую повторяемость получаемых поковок. Высота получаемых заготовок начинается от 50 мм, а диаметр от 10 мм и ограничивается только размерами и возможностями пресса.

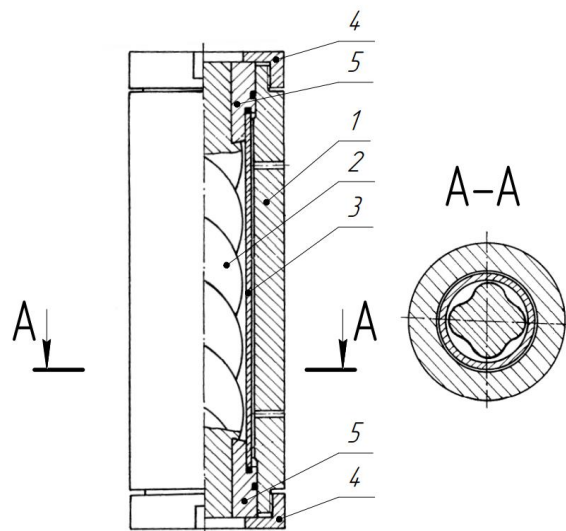


Рис. 9. Общий вид формы для гидроформовки корпуса обоймы одновинтового насоса:  
1 – корпус; 2 – формирующий винтовой стержень; 3 – трубчатая заготовка; 4 – стягивающие гайки; 5 – центрирующие втулки

Fig. 9. General view of the mold for hydroforming the cage body of a single-screw pump:  
1 is a body; 2 is a forming screw rod;  
3 is a tubular blank; 4 are tightening nuts;  
5 are centering bushings



Рис. 10. Корпуса обойм, изготовленные методом прессования

Fig. 10. Cage bodies made by a pressing method

Данный метод широко распространен при серийном производстве корпусов обойм одновинтовых машин, в связи с тем, что зачастую корпусу обоймы не требуется высокая точность, а также при этом методе обеспечивается низкая себестоимость при больших партиях.

К возможным методам формирования мелкогабаритных корпусов обойм можно отнести **накатку роликами** (рис. 11). Производительный метод изготовления винтовых поверхностей, при котором профи-

лирующие ролики продавливают наружную поверхность таким образом, чтобы внутри формировался циклоидальный винтовой профиль, является способом получения внутренней поверхности с низкой точностью, порядка 5-10 мм, даже на небольших габаритах обойм. Диаметр получаемых обойм не превышает 10-100 мм, но зато высота накатанного профиля может достигать до 6 м, что не требуется при сравнительно низком диаметре.



Рис. 11. Установка накатки винтовых труб  
Fig. 11. A screw pipe knurling machine

Следующий возможный метод – это **порошковая металлургия** [18]. Сложнопрофильную винтовую поверхность возможно изготовить и методами порошковой металлургии (рис. 12). Сущность метода заключается в прессовании металлического порошка в форму с последующим спеканием спрессованной заготовки в печи при высокой температуре. Но габариты получаемых деталей из порошка металлов сильно ограничены и, как правило, не превышают 100 мм по толщине. Также применение данного метода ограничено винтовым стержнем, который может быть затруднительно извлечь из получаемой спрессованной заготовки. Но при изготовлении мелкогабаритных конических винтовых обойм, используемых в микрокомпрессорах, не возникает проблемы извлечения стержня, так как у поверхности стержня есть уклоны. Разработка технологии изготовления винтовых обойм из порошковых металлов позволит расширить область применения одновинтовых машин и повысить их долговечность и надежность. Причем точность деталей, полученных порошковой металлургией, очень высокая и составляет порядка 0,02 мм, что обеспечит высокую точность конечного устройства.

Современные темпы развития 3D-печати позволили применять **аддитивные технологии** при изготовлении практически любых деталей. Методы аддитивной технологии получили широкое распространение во всех сферах производства. Так, корпус обоймы одновинтовых машин может быть напечатан FDM-

печатью из пластика PLA+ с последующей заливкой в него полиуретанового компаунда (рис. 13). Также на сегодняшний день широко распространена печать эластомерным термопластичным полиуретаном, из которого можно создать уже рабочую эластомерную часть обоймы. Причем точность 3D-печати относительно высока и может достигать 0,1 мм, также возможна печать мелкогабаритных деталей высотой от 10 мм и диаметром от 5 мм, а максимальные габариты печати ограничиваются только размерами самого принтера и могут достигать нескольких метров. К недостаткам данной технологии можно отнести ограниченность используемых материалов, низкие прочностные характеристики получаемых изделий, а также низкую производительность изготовления деталей. Этот метод получил широкое распространение при прототипировании различных узлов машин и агрегатов в связи с высокой гибкостью изготовления.



Рис. 12. Героторная пара, спеченная из металлического порошка  
Fig. 12. Gerotor pair sintered from metal powder



Рис. 13. Корпус обоймы в разрезе, напечатанный на 3D-принтере  
Fig. 13. Sectional view of the 3D printed cage

В результате исследования технологических возможностей методов формообразования внутренних циклоидальных винтовых поверхностей была сформирована **таблица**. Рассмотренные методы могут применяться для изготовления как корпусов обойм, так и для формообразования внутренней рабочей поверхности героторной пары.

Некоторые методы, представленные в **таблице**, применимы только для изготовления внутренней ЦВП из эластомерных материалов, что не позволяет изготовить рабочую поверхность обоймы из химически стойких фторопластов. Другие методы могут быть применены только к пластически деформируемым материалам, некоторым пластмассам и металлам. Такими методами зачастую изготавливают корпуса обойм одновинтовых машин, так как методы производительные, но не обладают высокой точностью. Также на сегодняшний день не существует метода изготовления высокоточной мелкогабаритной внутренней ЦВП с опти-

мальным соотношением высоты к диаметру обоймы, обеспечение которого необходимо для надежной работы прецизионных одновинтовых дозаторов. Отсутствует высокоточный лезвийный метод изготовления внутренних ЦВП со следующими размерными параметрами: диаметр – до 10 мм, высота – до 100 мм. Наиболее перспективным направлением для разработки метода обработки внутренней ЦВП может послужить метод эксцентрикового сверления или метод фрезерования сферической фрезой. С точки зрения авторов, наиболее перспективным является метод эксцентрикового сверления, который может быть применим для изготовления не только рабочей поверхности обоймы, но и для формообразования винтового корпуса обоймы. Также данный метод может обеспечить высокую производительность и точность обработки, но требует разработки специального инструмента и специализированного оборудования.

Таблица. Сравнение методов получения внутренней сложнопрофильной поверхности  
Table. Comparison of methods for producing an internal geometrically complex surface

Метод	Ограничение применяемого материала	Получаемая точность формы, мм	Высота	Диаметр	Особенности
Литьё полимера в форму	Полиуретаны, силиконы	0,04-0,2	От 100 до 2000 мм	От 10 до 200 мм	Точность зависит от усадки материала
Прессование полимера в форму	Каучуки NBR, FKM, EPDM	0,1-0,3	От 100 до 2000 мм	От 10 до 200 мм	Точность зависит от усадки материала
Эксцентриковое сверление	Металл, пластик	0,05-0,2	От 200 до 1000 мм	От 50 до 200 мм	Применяется инструмент с профилирующими лезвиями
ЭХО	Электропроводящие материалы	0,15-0,4	От 500 до 3000 мм	От 50 до 300 мм	Очень долгая обработка поверхности
Фрезерование сферической фрезой	Металл, пластик	н/д	От 100 до 500 мм	От 30 до 300 мм	Применяется для конических поверхностей компанией «Vert Technology»
Фрезерование дисковой фрезой	Металл, пластик	н/д	От 400 до 2000 мм	От 50 до 300 мм	Низкая жесткость инструмента, высокое соотношение диаметра к длине
Гидроформовка	Пластичные материалы	1-5	От 400 до 1500 мм	От 50 до 300 мм	Только для тонкостенных деталей
Прессование	Пластичные материалы	2-8	От 50 до 1000 мм	От 10 до 200 мм	Остается линия разъёма матрицы
Накатка	Пластичные материалы	5-10	От 200 до 6000 мм	От 10 до 100 мм	Низкая точность формы внутренней поверхности
Порошковая металлургия	Металлические порошки	0,01-0,05	От 20 до 100 мм	От 5 до 200 мм	Сложность в извлечении стержня
Аддитивные технологии	Металлы и пластики	0,1-0,5	От 10 до 500 мм	От 5 до 300 мм	Не для серийного производства, ограничение по материалам



### Заключение

Обзор показывает, что текущее состояние технологической подготовки производства деталей, содержащих внутренние ЦВП, не охватывает все направления развития конструкции одновинтовых объёмных машин. Многие рассмотренные методы обладают низкой технологической гибкостью и не соответствуют требованиям современного автоматизированного производства, что и обуславливает их малую распространённость. При этом нельзя не отметить экспоненциальный рост интереса к одновинтовой технике в мире. Уникальные технические возможности одновинтовых машин обуславливают этот интерес для совершенно полярных областей применения: в нефтегазовой промышленности – это одновинтовые забойные двигатели с размерами сечения рабочих органов до 600 мм, в электронике – это высокоточные дозирующие машины с размерами сечения от 3 мм. Такая масштабная дифференциация конструкции и разнообразие применяемых материалов требуют развития новых методов изготовления рабочих органов, содержащих ЦВП. Проанализировав текущую ситуацию, очевидно, что направления технологической науки, связанные с подготовкой производства и разработкой автоматизированных методов обработки внутренних ЦВП, являются важной стратегической задачей для промышленности любой индустриальной страны.

Наиболее остро ощущается необходимость в разработке технологических подходов, позволяющих формообразовывать мелкоразмерные внутренние циклоидальные винтовые поверхности из химически стойких полимеров. Детали, изготовленные таким методом из фторсодержащих полимеров, могут применяться в высокоточных дозирующих системах при работе с химически агрессивными средами. Реализация производства такого оборудования в нашей стране позволит повысить надежность, качество и снизить стоимость производства изделий силовой и микроэлектроники.

### Список источников

- Балденко Д.Ф., Коротаев Ю.А. Современное состояние и перспективы развития отечественных винтовых забойных двигателей // Бурение и нефть. 2012. №3. С. 3-7.
- Балденко Д.Ф., Балденко Ф.Д. Одновинтовые гидравлические машины в нефтегазовой промышленности: области применения и перспективы развития // Булатовские чтения. 2020. Т. 6. С. 48-53.
- Балденко Д.Ф., Балденко Ф.Д. История создания в России одновинтовых гидравлических машин // Бурение и нефть. 2021. №12. С. 4-10.
- Балденко Д.Ф., Балденко Ф.Д. Одновинтовые насосы в нефтяной промышленности – вчера, сегодня, завтра // Бурение и нефть. 2023. №7-8. С. 60-67.
- Исхаков Р.Р. Проблемы эффективности подачи химических реагентов // Молодежный вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2017. №1(16). С. 42-43.
- Numerical modeling on friction and wear behaviors of all-metal progressive cavity pump / Gang Cao, JiaNing Zhang, Yanbao Guo, Chuang Liu, Marembo Micheal, ChengSi Lv, Hao Yu, HengAn Wu // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2022, vol. 213, 110443. DOI: 10.1016/j.petrol.2022.110443
- Пат. 2325557 Российская Федерация, МПК F04C 2/107. Способ изготовления статора одновинтового насоса / А.В. Алтынов, М.В. Алтынова, А.Н. Карпов, О. А. Карпов, В. Г. Тамурка; заявитель и патентообладатель ФГУП «Центральное научно-конструкторское бюро» (ФГУП «ЦНКБ»). № 2006141379/06; заявл. 23.11.2006; опубл. 27.05.2008.
- Пат. 2500513 Российская Федерация, МПК B23P 15/00. Способ изготовления статора одновинтового насоса / А.Г. Мелехин, А.М. Минченков, В.Б. Шатров; заявитель и патентообладатель АО «Научно-производственное объединение "Искра"». № 2012145128/02; заявл. 23.10.2012; опубл. 10.12.2013.
- Гончаров А.А., Васильев А.С., Гемба И.Н. Современные методы обработки винтовых поверхностей роторов винтовых насосов // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2017. №1(40). С. 202-208.
- Современные методы финишной обработки циклоидальных винтовых поверхностей / П.Д. Акулиничев, М.А. Альбов, И.О. Зенин, И.Н. Гемба // Справочник. Инженерный журнал. 2021. №9(294). С. 3-11. DOI: 10.14489/hb.2021.09.pp.003-011
- Современные методы отделочно-упрочняющей обработки циклоидальных винтовых поверхностей / П.Д. Акулиничев, М.А. Альбов, А.А. Гончаров, И.О. Зенин // Справочник. Инженерный журнал. 2022. №11(308). С. 16-23. DOI: 10.14489/hb.2022.11.pp.016-023
- Patent 5150518 USA, IPC B23B5/46; B23C3/32; (IPC1-7): B23P15/10. Process for manufacturing inner and outer parts for a rotary piston machine in which the inner and outer parts have parallel axes / Erwin Fuchs; Assignee: Weingartner, Maschinenbau Gesellschaft M. B. H. (Kirchham, AT); filing date: 22.03.199; publication date: 29.09.1992.
- Пат. № 270988 Российская Федерация, МПК B23H 3/04, B23H 9/00. Электродный блок для электрохимической обработки винтового зубчатого профиля в отверстии трубчатой заготовки / Д.Н. Хайруллин, И.А. Мочалин, С.В. Мезенцев; заявитель и патентообладатель ООО «Фирма "Радиус-Сервис"». №2019106450; заявл. 06.03.2019; опубл. 23.12.2019.
- Производитель конических одновинтовых компрессоров Vert Technologies: [Электронный ре-

- сурс]. URL: <https://vertrotors.wordpress.com/>. (Дата обращения: 14.09.23).
15. Patent 20160158852 USA, IPC B23C3/32. Method and device for producing a cavity in a stator of a progressive cavity pump / Ralf Daunheimer; Assignee: Ralf Daunheimer; filing date: 17.07.2014; publication date: 09.06.2016.
  16. Пат. 2038459 Российская Федерация, МПК E21B 4/02. Способ изготовления трубчатой оболочки ротора винтового забойного двигателя / А.М. Кочнев, А.Н. Вшивков, В.Б. Голдобин, В.В. Хохлов; заявитель и патентообладатель Пермский филиал Всероссийского научно-исследовательского института буровой техники. № 5055938/03; заявл. 23.06.1992; опубл. 27.06.1995.
  17. Исследование процесса прессования медных труб и полых профилей на бутылочных иглах / В.Г. Белов, Т.Н. Боровик, К.В. Королев // Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике: сборник докладов Рос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. М.: Изд-во МИРЭА – Российский технологический университет, 2019. Т. 1. С. 314-319.
  18. Порошковая металлургия в Беларуси и в мире: тенденции развития и взаимное влияние / П.А. Витязь, А.Ф. Ильющенко, В.В. Савич // Актуальные проблемы порошкового материаловедения: материалы междунар. науч.-техн. конф. Пермь: Изд-во Пермского нац. исслед. политехн. ун-та, 2018. С. 11-20.
  19. Пархимович А.Б., Краснова А.В., Воейко О.А. Современное состояние и перспективы технологий аддитивного производства // Вестник молодой науки России. 2019. №3. С.10.
  20. iors of all-metal progressive cavity pump. Journal of Petroleum Science and Engineering. 2022;213:Article ID 110443. ISSN 0920-4105. DOI:10.1016/j.petrol.2022.110443
  7. Altynov A.V., Altynova M.V., Karpov A.N., Karpov O.A., Tamurka V.G. *Sposob izgotovleniia statora odnovintovogo nasosa* [Method for manufacturing the stator of a single screw pump]. Patent RU, no. 2325557, 2008.
  8. Melekhin A.G., Minchenkov A.M., Shatrov V.B. *Sposob izgotovleniia statora odnovintovogo nasosa* [Method for manufacturing the stator of a single screw pump]. Patent RU, no. 2500513, 2013.
  9. Goncharov A.A., Vasilev A.S., Gemba I.N. Modern methods of processing screw surfaces of screw pump rotors. *Vestnik Rybinskoy gosudarstvennoy aviatsionnoy tekhnologicheskoy akademii im. P.A. Soloveva* [Vestnik of Soloviev Rybinsk State Aviation Technological Academy]. 2017;(1(40)):202-208. (In Russ.)
  10. Akulinichev P.D., Albov M.A., Zenin I.O., Gemba I.N. Modern methods of finishing cycloidal helical surfaces. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal* [Handbook. Engineering Journal]. 2021;(9(294)):3-11. DOI:10.14489/hb.2021.09.pp.003-011
  11. Akulinichev P.D., Albov M.A., Goncharov A.A., Zenin I.O. Modern methods of finishing and strengthening treatment of cycloidal helical surfaces. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal* [Handbook. Engineering Journal]. 2022;(11(308)):16-23. DOI:10.14489/hb.2022.11.pp.016-023
  12. Erwin Fuchs. Process for manufacturing inner and outer parts for a rotary piston machine in which the inner and outer parts have parallel axes. Patent USA, no. 5150518, 1992.
  13. Khairullin D.N., Mochalin I.A., Mezentsev S.V. *Elektroodnyi blok dlya elektrokhimicheskoy obrabotki vintovogo zubchatogo profilya v otverstii trubchatoy zagotovki* [Electrode unit for electrochemical processing of helical gear profile in the hole of a tubular workpiece]. Patent RU, no. 270988, 2019.
  14. Manufacturer of conical single-screw compressors Vert Technologies. [Electronic resource]. Available at: <https://vertrotors.wordpress.com/>. (Accessed on September 14, 2023).
  15. Ralf Daunheimer. Method and device for producing a cavity in a stator of a progressive cavity pump. Patent USA, no. 20160158852, 2016.
  16. Kochnev A.M., Vshivkov A.N., Goldobin V.B., Khokhlov V.V. *Sposob izgotovleniya trubchatoy obolochki rotora vintovogo zaboyного dvigatelya* [Method for manufacturing a tubular rotor shell of a screw downhole motor]. Patent RU, no. 2038459, 1995.
  17. Belov V.G., Bоровик T.N., Korolev K.V. Study on the pressing process of copper pipes and hollow profiles on bottle needles. *Informatika i tekhnologii. Innovatsionnye tekhnologii v promyshlennosti i informatike: Sbornik докладov Rossiiskoy nauch.-tekh.*

### References

1. Baldenko D.F., Korotaev Yu.A. Current state and prospects for development of domestic screw downhole motors. *Burenie i neft* [Drilling and Oil]. 2012;(3):3-7. (In Russ.)
2. Baldenko D.F., Baldenko F.D. Single-screw hydraulic machines in the oil and gas industry: areas of application and development prospects. *Bulatovskie chteniia* [Bulatov readings]. 2020;6:48-53. (In Russ.)
3. Baldenko D.F., Baldenko F.D. History of the creation of single-screw hydraulic machines in Russia. *Burenie i neft* [Drilling and Oil]. 2021;(12):4-10. (In Russ.)
4. Baldenko D.F., Baldenko F.D. Single screw pumps in the oil industry: yesterday, today, tomorrow. *Burenie i neft* [Drilling and Oil]. 2023;(7-8):60-67. (In Russ.)
5. Iskhakov R.R. Problems of efficiency of chemical reagent supply. *Molodezhnyi vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta* [Youth Bulletin of Ufa State Aviation Technical University]. 2017;(1(16)):42-43. (In Russ.)
6. Gang Cao, JiaNing Zhang, Yanbao Guo, Chuang Liu, Marembo Micheal, ChengSi Lv, Hao Yu, HengAn Wu. Numerical modeling on friction and wear behav-

- konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Computer science and technology. Innovative technologies in the industry and computer science: Proceedings of the Russian Scientific and Technical Conference with International Participation]. Moscow: Publishing House of MIREA – Russian Technological University, 2019, vol. 1, pp. 314-319. (In Russ.)
18. Vityaz P.A., Ilyushchenko A.F., Savich V.V. Powder metallurgy in Belarus and in the world: development trends and mutual influence. *Aktualnye problemy poroshkovogo materialovedeniya: Materialy mezhdunarodnoy nauch.-tekhn. konferentsii* [Currently relevant issues of powder materials science: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference]. Perm: Publishing House of Perm National Research Polytechnic University, 2018, pp. 11-20. (In Russ.)
19. Parkhimovich A.B., Krasnova A.V., Voeiko O.A. Current state and prospects of additive manufacturing technologies. *Vestnik molodezhnoy nauki Rossii* [Bulletin of Youth Science of Russia]. 2019;(3):10. (In Russ.)

Поступила 11.03.2024; принята к публикации 28.06.2024; опубликована 30.09.2024  
Submitted 11/03/2024; revised 28/06/2024; published 30/09/2024

**Альбов Максим Александрович** – аспирант, ассистент кафедры технологии машиностроения, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.  
Email: maxim.albom@yandex.ru. ORCID 0000-0002-0753-6946

**Акулиничев Павел Дмитриевич** – аспирант, ассистент кафедры технологии машиностроения, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.  
Email: aka111996@mail.ru. ORCID 0000-0003-1846-7955

**Гончаров Александр Александрович** – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.  
Email: al.goncharow@yandex.ru. ORCID 0000-0003-3121-9120

**Maksim A. Albov** – postgraduate student, Teaching Assistant of the Department of Mechanical Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia.  
Email: maxim.albom@yandex.ru. ORCID: 0000-0002-0753-6946

**Pavel D. Akulinichev** – postgraduate student, Teaching Assistant of the Department of Mechanical Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia.  
Email: aka111996@mail.ru. ORCID: 0000-0003-1846-7955

**Alexander A. Goncharov** – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia.  
Email: al.goncharow@yandex.ru. ORCID: 0000-0003-3121-9120



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

УДК 621.99

DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-3-92-100

## РАСЧЕТ СИЛЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ВНУТРЕННЕЙ РЕЗЬБЫ ГРЕБЕНЧАТЫМИ РЕЗЬБОВЫМИ ФРЕЗАМИ

Мальков О.В., Карельский А.С.

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

**Аннотация.** Постановка задачи (актуальность работы). Резьбофрезерование является гибким и универсальным способом резбонарезания, обладающим надежностью и обеспечивающим точность и качество получаемой резьбы. Наиболее часто используются гребенчатые резьбовые фрезы, обеспечивающие наибольшую производительность обработки, при этом увеличение длины рабочей части инструмента приводит к увеличению силы резания, что приводит к появлению конусообразности резьбы и может снижать ее точность. Прогнозирование силы при резьбофрезеровании гребенчатыми конструкциями инструментов позволит решить ряд задач, обеспечивающих эффективную их работу, которые связаны с обеспечением точности внутренней метрической резьбы, прочности инструмента и равномерности работы, присутствующими вибрациями в технологической системе. **Цель работы.** Разработать теоретическую модель для расчета составляющих силы резания при резьбофрезеровании гребенчатой фрезой, которая учитывает составляющие силы резания всех единичных резьбообразующих профилей с учетом угла контакта. **Используемые методы.** Теоретическая модель силы резания разработана в программе PTC Mathcad Prime 3.1 на основании положений теории резания с использованием геометрического построения и проверки при помощи программы Компас-3D. **Новизна.** Предложенная теоретическая модель силы при фрезеровании гребенчатыми фрезами внутренней метрической резьбы описывает распределение срезаемого слоя между профилями зубьев инструмента с использованием модели силы при резьбофрезеровании однодисковыми фрезами [7] с учетом винтовых стружечных канавок и неравномерного окружного шага зубьев. **Результат.** Работоспособность предложенной теоретической модели силы при фрезеровании гребенчатыми резьбовыми фрезами подтверждена экспериментальными данными, расхождение с которыми не превысило 20%. **Практическая значимость.** Предложенная теоретическая модель составляющих силы при фрезеровании гребенчатыми резьбовыми фрезами позволяет на основе теоретического расчета решить ряд задач, связанных с обеспечением точности внутренней метрической резьбы, прочности инструмента, равномерности его работы.

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

© Мальков О.В., Карельский А.С., 2024

### Для цитирования

Мальков О.В., Карельский А.С. Расчет силы резания при обработке внутренней резьбы гребенчатыми резьбовыми фрезами // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №3. С. 92-100. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-92-100>



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

# CALCULATION OF CUTTING FORCE WHEN MACHINING INTERNAL THREADS WITH THREAD MILLING CUTTERS

Malkov O.V., Karelsky A.S.

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

**Abstract. Problem Statement (Relevance).** Thread milling is a flexible and universal method of threading, showing reliability and ensuring accuracy and the quality of the resulting internal thread. Thread milling cutters are the most often used ones, providing the highest machining performance, while increasing length of the operating part of the tool leads to an increase in cutting force, which leads to a taper thread and may reduce its accuracy. Predicting force during thread milling with comb-shaped structures of tools solves a number of tasks that ensure their efficient operation, which are related to ensuring accuracy of the internal metric thread, strength of the tool and uniform operation, and vibrations in the technological system. **Objectives.** The research is aimed at developing a theoretical model for calculating the components of cutting force during thread milling with a thread milling cutter, which factors into the distribution of the cutting force components for every thread-forming profile subject to the contact angle. **Methods Applied.** A theoretical model of cutting force was developed in PTC Mathcad Prime 3.1 based on the provisions of the cutting theory using geometric construction and verification with Kompas-3D. **Originality.** The proposed theoretical model of force during thread milling of internal metric threads with thread milling cutters describes the distribution of the cut layer between the profiles of tool teeth using a force model for thread milling with single-disc cutters [7], factoring into screw chip grooves and a non-uniform circumferential pitch of the teeth. **Result.** Efficiency of the proposed theoretical force model for thread milling with thread milling cutters is confirmed by experimental data. Discrepancy with such data did not exceed 20%. **Practical Relevance.** The proposed theoretical model of the force components in threading with thread milling cutters solves a number of problems related to ensuring accuracy of the internal metric thread, strength of the tool and its uniform operation based on theoretical calculation.

**Keywords:** thread milling, thread milling cutter, cutting force, modeling, cut layer

## For citation

Malkov O.V., Karelskiy A.S. Calculation of Cutting Force when Machining Internal Threads with Thread Milling Cutters. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 3, pp. 92-100. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-92-100>

## Введение

Резьбофрезерование все более широко используется в промышленном производстве изделий, что связано с рядом преимуществ процесса, таких как универсальность, надежность и качество получаемой внутренней метрической резьбы. При поломке резьбовая фреза легко извлекается из отверстия, что не приводит к сложноустраняемому браку, необходимости использования дополнительной операции извлечения инструмента и ремонту резьбы.

Наиболее часто используются гребенчатые резьбовые фрезы, которые позволяют повысить производительность за счет одновременной обработки всех витков резьбы за один планетарный оборот инструмента вокруг оси резьбы, что увеличивает силу резания по сравнению с обработкой однодисковым инструментом. Это может привести к снижению точности и качества обработки, а также поломке инструмента, поскольку при использовании кинематической схемы с параллельными осями резьбы и инструмента сила действует на инструмент как на консольную балку, вызывая радиальное и угловое перемещение свободного торца.

Анализ литературных источников [1-6] показал, что используемые подходы к оценке силы при резьбофрезеровании ограничены по трудоемкости получения данных и проведении расчетов, а также имеют ограничения и упрощения при описании моделей.

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

## Расчет составляющих силы при обработке гребенчатыми резьбовыми фрезами

В общем случае конструкция гребенчатой резьбовой фрезы содержит совокупность однодисковых резьбовых фрез с одинаковыми геометрическими и конструктивными параметрами, каждая из которых совершает одинаковую работу по формированию одного витка внутренней метрической резьбы и удаляет при этом срезаемый слой одинаковой формы (рис. 1, поз. 1). Различие заключается только во взаимном повороте дисков друг относительно друга относительно оси инструмента из-за наличия угла наклона стружеч-

ных канавок, в результате чего каждый резбообразующий профиль соответствующего зуба инструмента будет находиться в различных областях срезаемого слоя и контактировать с ним по площади, соответствующей сочетанию угла поворота инструмента относительно своей оси и угла наклона винтовых стружечных канавок. Исходя из этих соображений, следует формировать последовательность расчета составляющих силы при резбофрезеровании гребенчатыми инструментами, используя теоретическую модель силы резания однодисковыми резбовыми фрезами [7].

На основании приведенных отличий однодисковой и гребенчатой фрез расчет силы резания при работе последней следует вести интегрально по всем элементам, одновременно участвующим в работе с учетом модели [7].

На рис. 2 представлена расчетная схема для определения значений составляющих силы при резбофрезеровании гребенчатым инструментом.

Для алгоритмизации расчетов резбообразующие диски пронумерованы в матричном виде ( $z, m$ ), где первое число  $z$  обозначает номер зуба (например, на рисунке показаны параметры для трехзубой фрезы

$z \in \{1, 2, 3\}$ ), а второе число – порядковый номер  $m$  резбообразующего диска с началом отсчета от торца фрезы (рис. 2). Вследствие наличия ненулевого угла наклона стружечной канавки введена угловая координата каждого текущего резбового профиля  $\chi_m$  с угловым шагом между профилями  $\Delta\chi$ . На рис. 2 выделены профили, участвующие в резании на момент расчета, и элементарные срезаемые слои, обозначенные цифрой 4. На примере профиля 2.4 на втором зубе фрезы показаны направления составляющих силы резания: касательной  $P_{r2,4}$ , радиальной  $P_{r2,4}$ , равнодействующей  $P_{xy2,4}$  и осевой  $P_{z2,4}$ .

Срезаемый слой определяется углом контакта  $\theta = \theta_{\min} + \theta_{\max}$  (см. рис. 2) [8]. Для определения координаты сечения внутри срезаемого слоя используется параметр  $\Delta\theta$  как угловой шаг между двумя соседними сечениями. Чем меньше параметр  $\Delta\theta$ , тем больше расчетных сечений, которые получают в общей матрице  $i$ -ю индексацию столбцов. И, как следствие, сложнее, но точнее общий расчет. Вторым параметром двумерного массива (1) является номер резбообразующего диска  $m$ .

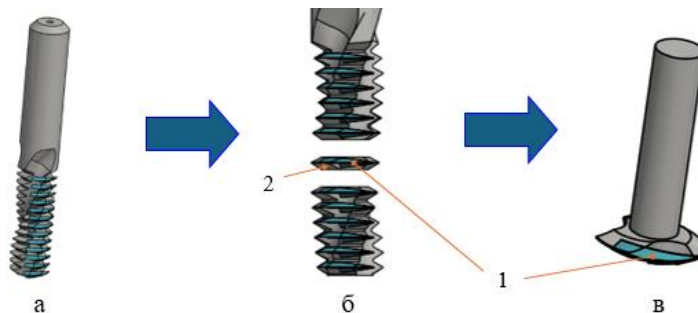


Рис. 1. Иллюстрация представления гребенчатой фрезы как совокупности однодисковых: а – гребенчатая резбовая фреза; б – элементарный резбообразующий диск; в – однодисковая фреза; 1 – срезаемый слой; 2 – резбообразующий диск

Fig. 1. The representation of the thread milling cutter as a set of single-disc cutters: a is a thread milling cutter; б is an elementary threading disc; в is a single-disc milling cutter; 1 is a cut layer, 2 is a threading disc

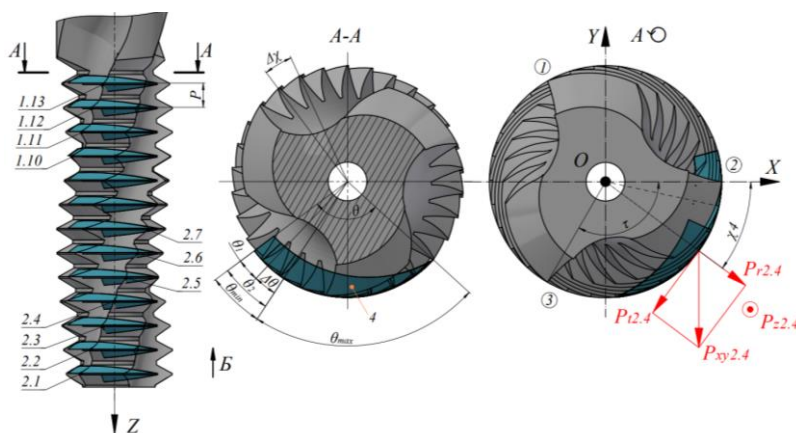


Рис. 2. Схема алгоритмизации расчета составляющих силы резбофрезерования:

1, 2, 3 – номер зуба; 4 – срезаемый слой

Fig. 2. An algorithm presentation diagram for calculating the thread milling force components:

1, 2, 3 is tooth number, 4 is a cut layer

Результаты для одного зуба в этом случае принимают вид (на примере составляющей силы  $P_{tz}$ , где индекс  $z$  характеризует порядковый номер зуба (см. рис. 2)):

$$P_{tz} = \begin{bmatrix} P_{i1,1}(\theta_{\min} + (z-1) \cdot \tau) & \cdots & P_{i1,1}(\theta_{\min} + (i-1) \cdot \Delta\theta + (z-1) \cdot \tau) \\ P_{i1,2}(\theta_{\min} + 1 \cdot \Delta\chi + (z-1) \cdot \tau) & \cdots & P_{i1,2}(\theta_{\min} + 1 \cdot \Delta\chi + (i-1) \cdot \Delta\theta + (z-1) \cdot \tau) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{i1,m}(\theta_{\min} + (m-1) \cdot \Delta\chi + (z-1) \cdot \tau) & \cdots & P_{i1,m}(\theta_{\min} + (m-1) \cdot \Delta\chi + (i-1) \cdot \Delta\theta + (z-1) \cdot \tau) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $P_{ii,m}(\theta_i)$  – касательная составляющая силы резания, Н;  $\tau$  – угловой шаг зубьев фрезы, град.

Угловое смещение в соответствии с представленной схемой определяется следующим образом:

$$\Delta\chi = \frac{2P \cdot \operatorname{tg} \omega}{d_p}, \quad (2)$$

где  $P$  – шаг резбообразующих профилей, мм;  $\omega$  – угол наклона винтовых стружечных канавок, град;  $d_p$  – диаметр резбовой фрезы, мм.

Угловой шаг зубьев  $\tau$  должен учитывать погрешность углового шага инструмента при его изготовлении  $\delta\tau_z$ , а также параметр  $\Delta\tau$  при использовании неравномерного углового шага:

$$\tau = \frac{360^\circ}{z} \pm \Delta\tau \pm \delta\tau_z. \quad (3)$$

Алгоритм расчета, описанный матрицей (1), пространен и реализован при определении всех составляющих силовых характеристик.

Матричная запись составляющих силы резания, рассчитанных по (1), составляется таким образом, что каждое значение составляющей силы резания внутри матрицы рассчитывается для угловой координаты  $\theta_i$ , определяемой по формуле

$$\theta_i = \theta_{\min} + (m-1) \cdot \Delta\chi + (i-1) \cdot \Delta\theta + (z-1) \cdot \tau. \quad (4)$$

Такая форма записи позволяет определить нахождение профиля зуба фрезы в контакте со срезаемым слоем при условии:  $\theta_{\min} \leq \theta < \theta_{\max}$ . В случае несоответствия условию матрица будет содержать нулевые значения. Однако при больших значениях угла  $\omega$  для большого числа зубьев угловая координата может быть  $\theta_i \geq 2\pi$ , а профили зуба будут находиться в контакте со срезаемым слоем. Для таких случаев было определено условие исключения части, кратной  $2\pi$ :

$$\theta_i \in \left[ \zeta \cdot 2\pi - \frac{\pi}{2}, \zeta \cdot 2\pi + \frac{\pi}{2} \right] \rightarrow \theta_i \in \left[ -\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right], \quad (5)$$

где  $\zeta$  – параметр, задающий номер полного оборота текущей угловой координаты.

Описанный прием позволяет уменьшить расчетную матрицу и повысить эффективность вычислений.

Интегральные значения силовых характеристик получены почисленным сложением всех элементов в формате суммарной матрицы:

$$\begin{cases} \overline{P_{t\Sigma}} = \overline{P_{t1}} + \overline{P_{t2}} + \dots + \overline{P_{tz}}; \\ \overline{P_{r\Sigma}} = \overline{P_{r1}} + \overline{P_{r2}} + \dots + \overline{P_{rz}}; \\ \overline{P_{z\Sigma}} = \overline{P_{z1}} + \overline{P_{z2}} + \dots + \overline{P_{zz}}. \end{cases} \quad (6)$$

Распределение составляющих силы резания в матричном виде по формуле (1) для каждого зуба на примере касательной составляющей для трехзубой резбовой фрезы представлено на рис. 3. По формуле (6) выполнялось суммирование значений по количеству зубьев с формированием суммарной матрицы (см. рис. 3).

Кинематическая схема работы гребенчатой резбовой фрезы предполагает консольную нагрузку на инструмент. Предварительные исследования показали, что осевая составляющая силы резания однодисковой фрезой составляет не более 10% от касательной составляющей, а на контактное взаимодействие будет оказывать влияние как касательная, так и радиальная составляющая силы. В связи с этим кроме отдельных составляющих проводился расчет составляющей силы в плоскости, перпендикулярной оси резбы  $P_{xy} = \sqrt{P_t^2 + P_r^2}$ , которая была использована при оценке конусности формируемой резбы и в итоге ее влияния на степень точности резбы.

Представленная теоретическая модель расчета составляющих силовых характеристик резбофрезирования позволяет провести предварительную оценку условий работы резбовой гребенчатой фрезы. Отклонения от экспериментально полученных значений были определены при исследованиях в учебном центре компании *Sandvik Coromant* [9].

Регистрация составляющих силы резания при резбофрезировании проведена с помощью диагностического стенда на базе динамометра Kistler 9257b [10]. Обработка результатов выполнена посредством программного обеспечения DynoWare [11].

Вертикальная составляющая зарегистрированных параметров соответствует составляющей силы резания  $P_z$ . Поэтому полученные значения приняты для сравнительного анализа без дополнительных пересчетов или преобразований.

№	Распределение касательной составляющей силы для 1-го зуба фрезы																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	P <sub>1.1.1</sub>	P <sub>1.1.2</sub>	P <sub>1.1.3</sub>	P <sub>1.1.4</sub>	P <sub>1.1.5</sub>	P <sub>1.1.6</sub>	P <sub>1.1.7</sub>	P <sub>1.1.8</sub>	P <sub>1.1.9</sub>	P <sub>1.1.10</sub>	0	0	0	0	0	0	0
2	0	P <sub>1.2.2</sub>	P <sub>1.2.3</sub>	P <sub>1.2.4</sub>	P <sub>1.2.5</sub>	P <sub>1.2.6</sub>	P <sub>1.2.7</sub>	P <sub>1.2.8</sub>	P <sub>1.2.9</sub>	P <sub>1.2.10</sub>	P <sub>1.2.11</sub>	0	0	0	0	0	0
3	0	0	P <sub>1.3.3</sub>	P <sub>1.3.4</sub>	P <sub>1.3.5</sub>	P <sub>1.3.6</sub>	P <sub>1.3.7</sub>	P <sub>1.3.8</sub>	P <sub>1.3.9</sub>	P <sub>1.3.10</sub>	P <sub>1.3.11</sub>	P <sub>1.3.12</sub>	0	0	0	0	0
4	0	0	0	P <sub>1.4.4</sub>	P <sub>1.4.5</sub>	P <sub>1.4.6</sub>	P <sub>1.4.7</sub>	P <sub>1.4.8</sub>	P <sub>1.4.9</sub>	P <sub>1.4.10</sub>	P <sub>1.4.11</sub>	P <sub>1.4.12</sub>	P <sub>1.4.13</sub>	0	0	0	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	P <sub>1.12.12</sub>	P <sub>1.12.13</sub>	P <sub>1.12.14</sub>	P <sub>1.12.15</sub>	P <sub>1.12.16</sub>	P <sub>1.12.17</sub>
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	P <sub>1.13.13</sub>	P <sub>1.13.14</sub>	P <sub>1.13.15</sub>	P <sub>1.13.16</sub>	P <sub>1.13.17</sub>

+

№	Распределение касательной составляющей силы для 2-го зуба фрезы																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	P <sub>2.1.13</sub>	P <sub>2.1.14</sub>	P <sub>2.1.15</sub>	P <sub>2.1.16</sub>	P <sub>2.1.17</sub>
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	P <sub>2.2.14</sub>	P <sub>2.2.15</sub>	P <sub>2.2.16</sub>	P <sub>2.2.17</sub>
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	P <sub>2.3.15</sub>	P <sub>2.3.16</sub>	P <sub>2.3.17</sub>
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	P <sub>2.4.16</sub>	P <sub>2.4.17</sub>
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	P <sub>2.5.17</sub>
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

+

№	Распределение касательной составляющей силы для 3-го зуба фрезы																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	P <sub>3.3.1</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
11	P <sub>3.11.1</sub>	P <sub>3.11.2</sub>	P <sub>3.11.3</sub>	P <sub>3.11.4</sub>	P <sub>3.11.5</sub>	P <sub>3.11.6</sub>	P <sub>3.11.7</sub>	P <sub>3.11.8</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	P <sub>3.12.1</sub>	P <sub>3.12.2</sub>	P <sub>3.12.3</sub>	P <sub>3.12.4</sub>	P <sub>3.12.5</sub>	P <sub>3.12.6</sub>	P <sub>3.12.7</sub>	P <sub>3.12.8</sub>	P <sub>3.12.9</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
13	P <sub>3.13.1</sub>	P <sub>3.13.2</sub>	P <sub>3.13.3</sub>	P <sub>3.13.4</sub>	P <sub>3.13.5</sub>	P <sub>3.13.6</sub>	P <sub>3.13.7</sub>	P <sub>3.13.8</sub>	P <sub>3.13.9</sub>	P <sub>3.13.10</sub>	0	0	0	0	0	0	0

=

№	Распределение суммарной касательной составляющей силы для всех зубьев																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	P <sub>1.1.1</sub>	P <sub>1.1.2</sub>	P <sub>1.1.3</sub>	P <sub>1.1.4</sub>	P <sub>1.1.5</sub>	P <sub>1.1.6</sub>	P <sub>1.1.7</sub>	P <sub>1.1.8</sub>	P <sub>1.1.9</sub>	P <sub>1.1.10</sub>	0	0	P <sub>2.1.13</sub>	P <sub>2.1.14</sub>	P <sub>2.1.15</sub>	P <sub>2.1.16</sub>	P <sub>2.1.17</sub>
2	0	P <sub>1.2.2</sub>	P <sub>1.2.3</sub>	P <sub>1.2.4</sub>	P <sub>1.2.5</sub>	P <sub>1.2.6</sub>	P <sub>1.2.7</sub>	P <sub>1.2.8</sub>	P <sub>1.2.9</sub>	P <sub>1.2.10</sub>	P <sub>1.2.11</sub>	0	0	P <sub>2.2.14</sub>	P <sub>2.2.15</sub>	P <sub>2.2.16</sub>	P <sub>2.2.17</sub>
3	0	0	P <sub>1.3.3</sub>	P <sub>1.3.4</sub>	P <sub>1.3.5</sub>	P <sub>1.3.6</sub>	P <sub>1.3.7</sub>	P <sub>1.3.8</sub>	P <sub>1.3.9</sub>	P <sub>1.3.10</sub>	P <sub>1.3.11</sub>	P <sub>1.3.12</sub>	0	0	P <sub>2.3.15</sub>	P <sub>2.3.16</sub>	P <sub>2.3.17</sub>
4	P <sub>3.3.1</sub>	0	0	P <sub>1.4.4</sub>	P <sub>1.4.5</sub>	P <sub>1.4.6</sub>	P <sub>1.4.7</sub>	P <sub>1.4.8</sub>	P <sub>1.4.9</sub>	P <sub>1.4.10</sub>	P <sub>1.4.11</sub>	P <sub>1.4.12</sub>	P <sub>1.4.13</sub>	0	0	P <sub>2.4.16</sub>	P <sub>2.4.17</sub>
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
10	P <sub>3.10.1</sub>	P <sub>3.10.2</sub>	P <sub>3.10.3</sub>	P <sub>3.10.4</sub>	P <sub>3.10.5</sub>	P <sub>3.10.6</sub>	P <sub>3.10.7</sub>	0	0	P <sub>1.10.10</sub>	P <sub>1.10.11</sub>	P <sub>1.10.12</sub>	P <sub>1.10.14</sub>	P <sub>1.10.15</sub>	P <sub>1.10.16</sub>	P <sub>1.10.17</sub>	P <sub>1.10.17</sub>
11	P <sub>3.11.1</sub>	P <sub>3.11.2</sub>	P <sub>3.11.3</sub>	P <sub>3.11.4</sub>	P <sub>3.11.5</sub>	P <sub>3.11.6</sub>	P <sub>3.11.7</sub>	P <sub>3.11.8</sub>	0	0	P <sub>1.11.11</sub>	P <sub>1.11.12</sub>	P <sub>1.11.13</sub>	P <sub>1.11.14</sub>	P <sub>1.11.15</sub>	P <sub>1.11.16</sub>	P <sub>1.11.17</sub>
12	P <sub>3.12.1</sub>	P <sub>3.12.2</sub>	P <sub>3.12.3</sub>	P <sub>3.12.4</sub>	P <sub>3.12.5</sub>	P <sub>3.12.6</sub>	P <sub>3.12.7</sub>	P <sub>3.12.8</sub>	P <sub>3.12.9</sub>	0	0	P <sub>1.12.12</sub>	P <sub>1.12.13</sub>	P <sub>1.12.14</sub>	P <sub>1.12.15</sub>	P <sub>1.12.16</sub>	P <sub>1.12.17</sub>
13	P <sub>3.13.1</sub>	P <sub>3.13.2</sub>	P <sub>3.13.3</sub>	P <sub>3.13.4</sub>	P <sub>3.13.5</sub>	P <sub>3.13.6</sub>	P <sub>3.13.7</sub>	P <sub>3.13.8</sub>	P <sub>3.13.9</sub>	P <sub>3.13.10</sub>	0	0	P <sub>1.13.13</sub>	P <sub>1.13.14</sub>	P <sub>1.13.15</sub>	P <sub>1.13.16</sub>	P <sub>1.13.17</sub>

Рис. 3. Суммарная матрица для расчета касательной составляющей силы резания  $P_{t,z,m,i}$  (где  $z$  – номер зуба;  $m$  – номер резьбообразующего профиля;  $i$  – номер сечения срезаемого слоя на примере трехзубой резьбовой фрезы)

Fig. 3. The total matrix for calculating the tangential component of cutting force  $P_{t,z,m,i}$  (where  $z$  is tooth number,  $m$  is the number of the thread-forming profile,  $i$  is the number of the section of the cut layer using a three-tooth thread cutter as the example)

Исходные данные для расчета составляющих силы резания и план эксперимента по резьбофрезерованию гребенчатыми резьбовыми фрезами сведены в табл. 1.

Так как в расчетной модели использована модель работы однодисковой резьбовой фрезой [7], то в качестве исходных данных использованы параметры резьбы и геометрические параметры режущей части однодисковой фрезы (диаметр инструмента  $d_p$ , мм; передний и задний углы в торцевом сечении  $\gamma_T$ ,  $\alpha_T$ ,

град; длина фасочной части резьбообразующего профиля  $l_f$ , мм; радиусы округления и износ кромок резьбообразующего профиля  $\rho_1$ ,  $\rho_2$ ,  $\rho_3$ ,  $h_{31}$ ,  $h_{32}$ ,  $h_{33}$ , мм; число зубьев  $z$ ; биение зубьев фрезы –  $\Delta h$ , мм; неравномерный угловой шаг  $\tau$ , град), а также геометрические параметры, присущие гребенчатым резьбовым фрезам (угол наклона стружечных канавок  $\omega$ , град; длина рабочей части фрезы  $l_p$ , мм), свойства материалов заготовки и инструмента, параметры режима резания.



Графическое отображение результатов экспериментальных исследований и теоретических расчетов силовых характеристик при резбозерезовании представлено на рис. 4. В результате анализа полученных зависимостей выявлено, что графики экспериментальных исследований и теоретических расчетов имеют одинаковые тенденции изменения, близкие

максимальные значения функций, знак этих максимальных значений и идентичный угол контакта  $\theta$ , что показывает работоспособность теоретической модели. Негладкость экспериментальных зависимостей вызвана возникающими при резбозерезовании вибрациями, которые в теоретическую модель на данном этапе не введены.

Таблица 1. Исходные данные для расчета составляющих силы резания

Table 1. Initial data for calculating the cutting force components

Параметры резбы	Параметры инструмента
$D = 16$ мм $P = 1$ мм $D_f = 15$ мм	$d_p = 13,9$ мм; $l_p = 10$ мм; $l_f = 0,145$ мм $z = 5$ ; $\Delta h = 0,01$ мм; $\tau = 0^\circ$ $\rho_1 = 0,008$ мм; $\rho_2 = 0,008$ мм; $\rho_3 = 0,016$ мм $\omega = 10^\circ$ ; $\gamma_T = 10^\circ$ ; $\alpha_T = 9^\circ$ $h_{31} = 0,001$ мм; $h_{32} = 0,001$ мм; $h_{33} = 0,003$ мм
Свойства материала заготовки (сталь 45)	Свойства материала инструмента (BK10)
$\sigma_B = 640$ МПа $\sigma_{0,2} = 245$ МПа $\lambda = 48$ Дж/(м·с·С°) $a = 1,301 \cdot 10^{-8}$ м <sup>2</sup> /с	$\lambda_p = 71$ Дж/(м·с·С°)
	<b>Параметры режима обработки</b>
	$V = 90$ м/мин $S_z = 0,085$ мм/зуб Встречное фрезерование
<b>План эксперимента</b>	
<i>Варьируемый фактор</i>	<i>Диапазон варьирования фактора</i>
$D$ , мм	16; 20; 24; 30; 36
$S_z$ , мм/зуб	0,040; 0,046; 0,050; 0,054; 0,058; 0,062; 0,068; 0,074; 0,078; 0,085
$l_p$ , мм	4; 5; 10; 14; 18; 22
$d_p$ , мм	6; 8; 10; 14

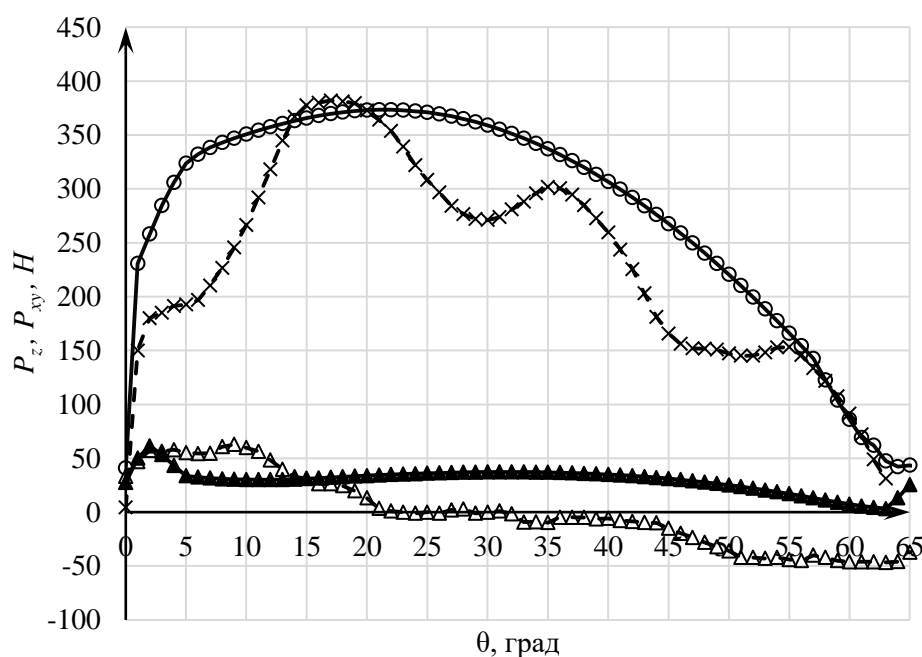


Рис. 4. Графики зависимости расчетных  $P_{xy}(\circ)$ ,  $P_z(\blacktriangle)$  и экспериментальных  $P_{xy}(x)$ ,  $P_z(\Delta)$  составляющих силовых характеристик от положения расчетного сечения в области угла контакта

Fig. 4. Curves of the dependence between calculated  $P_{xy}(\circ)$ ,  $P_z(\blacktriangle)$  and experimental  $P_{xy}(x)$ ,  $P_z(\Delta)$  components of the power characteristics, and the position of the calculated section in the area of the contact angle

Для всех реализуемых условий плана эксперимента (см. табл. 1) получены значения максимальной равнодействующей составляющей  $P_{xy}$ , представленные на рис. 5.

Иллюстрации зависимостей, представленные на рис. 5, позволяют установить, что увеличение силы резания при резьбофрезеровании наблюдается при увеличении диаметра обрабатываемой резьбы, параметров режима резания (в частности, подачи на зуб) и длины консольной части работающей фрезы. Уменьшение диаметра фрезы приводит к уменьшению составляющих силы резания. Указанные изменения коррелируют с изменяющейся величиной площади сечения срезаемого слоя, что подтверждается результатами проведенных ранее исследований [12]. Наибольшее влияние на силу резания оказывает длина рабочей части инструмента. Расхождение расчетных и экспериментальных значений не превысило 20% по всему плану эксперимента.

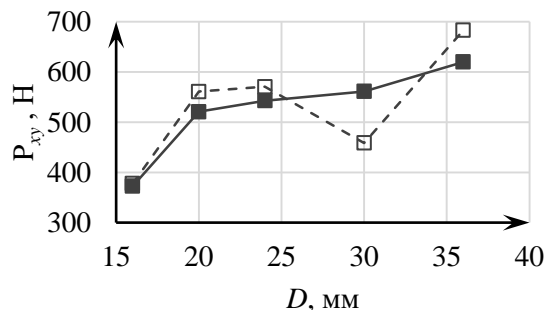
В табл. 2 представлен план расчетного исследования, составленный и реализованный для выявления влияния конструктивных параметров резьбовых гребенчатых фрез ( $\omega$ ,  $l_p$ ) на составляющие силовых характеристик. Для сравнения с расчетной моделью использовались экспериментальные данные для фрезы с углом наклона стружечной канавки  $10^\circ$  (Sandvik Coromant R217.15140100AC26N 1630 ( $z = 5$ )). План эксперимента был расширен в области углов наклона стружечной канавки и длины рабочей части.

Таблица 2. План расчетного исследования для выявления влияний конструктивных параметров резьбовых гребенчатых фрез на составляющие силы резьбофрезерования  
Table 2. The design study plan to identify effects of the design parameters of thread milling cutters on the thread milling force components

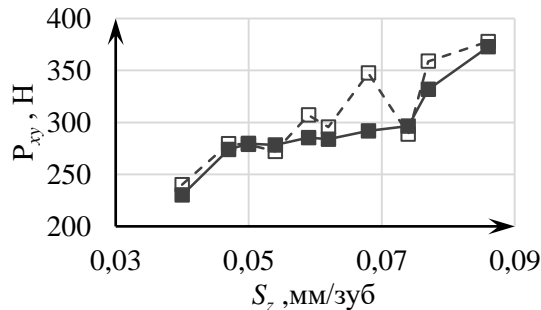
Параметр	Диапазон изменения параметра
$\omega$ , град	-40; -30; -20; -10; 0; 10; 20; 30; 40
$l_p$ , мм	5; 10; 15; 20; 25

По предложенному плану проведен расчет и построены графики зависимостей составляющих силы резания, представленные на рис. 6. Постоянные значения при расчете согласно плану эксперимента (см. табл. 2) использовались в соответствии с представленными в табл. 1.

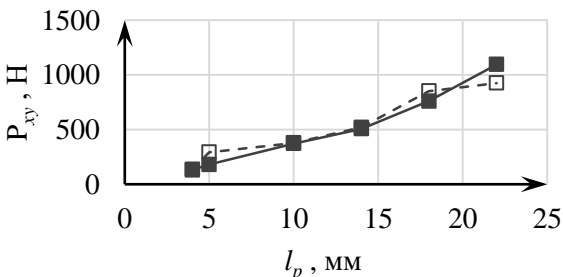
Представленные на рис. 6 графики показывают, что изменение угла наклона стружечных канавок оказывает значительное влияние на величину составляющих силы резьбофрезерования (рис. 6, а). Причем изменения радиальной и осевой составляющих представляют собой монотонно убывающую зависимость от крайней величины левого угла наклона к крайней величине правого угла наклона, что указывает на изменение их направлений. А касательная составляющая имеет максимальное значение в области  $\omega = 0^\circ$ , то есть для прямых зубьев фрезы. Указанные изменения вызваны перераспределением и перенаправлением элементарных векторов силы резания на каждом из трех сторон резьбообразующего профиля.



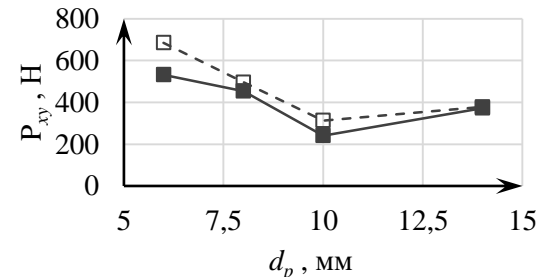
а



б



в



г

Рис. 5. Графики зависимостей силы резания  $P_{xy}$  от исходных параметров ( $D$  (а);  $S_z$  (б);  $l_p$  (в);  $d_p$  (г)) для экспериментальных ( $\square$ ) и расчетных ( $\blacksquare$ ) значений

Fig. 5. Curves of the dependence between cutting force  $P_{xy}$  and initial parameters ( $D$  (a);  $S_z$  (б);  $l_p$  (в);  $d_p$  (г)) for experimental ( $\square$ ) and calculated ( $\blacksquare$ ) values

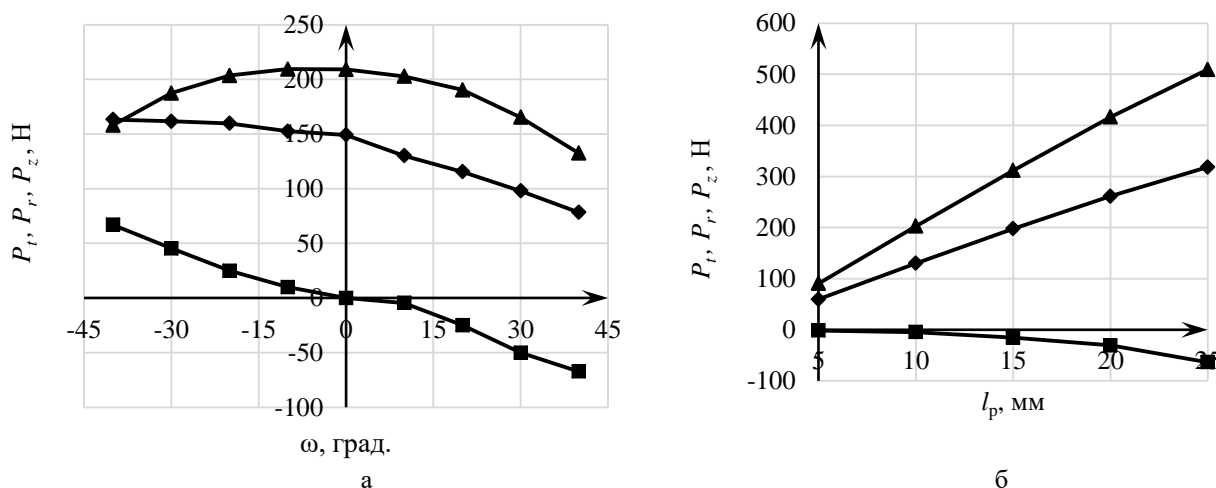


Рис. 6. Графики зависимостей касательной  $P_t$  (▲), радиальной  $P_r$  (◆) и осевой  $P_z$  (■) составляющих силы от угла наклона  $\omega$  (а) и длины рабочей части фрезы  $l_p$  (б)  
 Fig. 6. Curves of the dependence between tangential  $P_t$  (▲), radial  $P_r$  (◆) and axial  $P_z$  (■) components of force, and the angle of inclination  $\omega$  (a) and length of the operating part of the cutter  $l_p$  (б)

Номинальные значения составляющих резбозерезования в зависимости от длины рабочей части монотонно увеличиваются (рис. 6, б). Это полностью коррелирует с экспериментальными исследованиями и вызвано увеличением площади сечения срезаемого слоя из-за увеличения числа одновременно работающих профилей. Важность представленных зависимостей определена необходимостью повышения производительности резбозерезования с возможностью прогнозирования условий обработки, исключения повышенного отгиба, вибраций и интенсивности изнашивания инструмента.

### Заклучение

Разработанная теоретическая модель расчета силы резания при обработке внутренних метрических резьб гребенчатой фрезой подтверждена результатами экспериментального исследования и может быть использована для разработки общей модели по оценке конусности резьбы, равномерности резбозерезования и управления амплитудой составляющих силы при резбозерезовании для обеспечения заданной точности формообразования внутренних метрических резьб.

### Список источников

1. Сайкин С.А., Цветков Е.В., Толкачев А.В. Измерение силы резания и крутящего момента при резбозерезовании // Научные технологии в машиностроении. 2023. №1(139). С. 24-30. DOI: 10.30987/2223-4608-2023-1-24-30
2. Косарев В.А., Гречишников В.А., Косарев Д.В. Исследование силовых параметров при фрезеровании внутренних резьб с планетарным движением инструмента // СТИИ. 2009. №8. С. 19-22.
3. A model for thread milling cutting forces / A.C. Araujo, J.L. Silveira, M.B. Jun, S.G. Kapoor, and R.

- DeVor // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2006, vol. 46(15), pp. 2057-2065.
4. Мальков О.В., Головки И.М. Экспериментальное определение модели силы при резбозерезовании // Инновации в машиностроении: сборник трудов Международной молодежной конференции; Юргинский технологический институт. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. С. 73-77.
5. Araujo A.C., Fromentin G., Poulachon G. Analytical and experimental investigations on thread milling forces in titanium alloy // International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2013, vol. 67, pp. 28-34.
6. Волков Д.И., Сайкин С.А. Расчет силы резания при фрезеровании внутренней резьбы в жаропрочных сплавах // Вестник РГТА имени П.А. Соловьева. 2010. №1(16). С. 145-150.
7. Мальков О.В., Карельский А.С. Теоретический расчет составляющих силы резания при резбозерезовании // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №4. С. 46-57.
8. Мальков О.В., Головки И.М., Карельский А.С. Теоретический расчет параметров сечения срезаемого слоя при резбозерезовании // Известия вузов. Машиностроение. 2018. №10(703). С. 24-36.
9. Павлюченков И.А. Разработка системы проектирования резьбовых фрез с учетом обеспечения технологичности их изготовления: дис. ... канд. техн. наук. М., 2022.
10. Контрольно-измерительный диагностический стенд для экспериментальных исследований в технологии механической обработки / Древал А.Е., Васильев С.Г., Виноградов Д.В., Мальков О.В. // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 12. Режим доступа:

[https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_22794716\\_82712685.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_22794716_82712685.pdf) (дата обращения 20.03.2024).

11. Карельский А.С. Повышение точности резьбофрезерования на основе снижения силового взаимодействия инструмента и заготовки: дис. ... канд. техн. наук. М., 2022.
12. Мальков О.В., Карельский А.С. Моделирование срезаемого слоя при резьбофрезеровании // Известия вузов. Машиностроение. 2017. №9. С. 54-64. DOI: 10.18698/0536-1044-2017-9-54-64

### References

1. Saykin S.A., Tsvetkov E.V., Tolkachev A.V. Measurement of cutting force and torque during thread milling. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroyeni* [Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering]. 2023;(1(139)):24-30. (In Russ.) DOI: 10.30987/2223-4608-2023-1-24-30
2. Kosarev V.A., Grechishnikov V.A., Kosarev D.V. Study on force parameters during milling of internal threads with planetary movement of the tool. *STIN* [Russian Engineering Research]. 2009;(8):19-22. (In Russ.)
3. Araujo A.C., Silveira J.L., Jun M.B., Kapoor S.G., DeVor R. A model for thread milling cutting forces. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2006;46(15):2057-2065.
4. Malkov O.V., Golovko I.M. Experimental determination of the force model during thread milling. *Innovatsii v mashinostroyeni: sbornik trudov Mezhdunarodnoy molodezhnoy konferentsii; Yurginskiy tekhnologicheskii institut* [Innovations in Mechanical Engineering: Proceedings of the International Youth Conference]. Yurga Institute of Technology. Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University, 2012, pp. 73-77. (In Russ.)
5. Araujo A.C., Fromentin G., Poulachon G. Analytical and experimental investigations on thread milling forces in titanium alloy. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2013;67:28-34.
6. Volkov D.I., Saykin S.A. Calculating cutting force when milling internal threads in heat-resistant alloys.

7. Malkov O.V., Karelskiy A.S. Theoretical calculation of the components of thread milling cutting forces. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023;21(4):44-55. (In Russ.)
8. Malkov O.V., Golovko I.M., Karelskiy A.S. Theoretical calculation of parameters of the cut layer cross section when thread milling. *Izvestiya vuzov. Mashinostroyeni* [News of Higher Educational Institutions. Mechanical Engineering]. 2018;(10(703)):24-36. (In Russ.)
9. Pavlyuchenkov I.A. *Razrabotka sistemy proektirovaniya rezbovykh frez s uchetom obespecheniya tekhnologichnosti ikh izgotovleniya: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Development of a design system for threaded cutters, factoring into their manufacturability. PhD thesis]. Moscow, 2022.
10. Dreval A.E., Vasiliev S.G., Vinogradov D.V., Malkov O.V. An instrumentation diagnostic stand for experimental studies in machining technology. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education. Bauman Moscow State Technical University]. Available at: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_22794716\\_82712685.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_22794716_82712685.pdf) (Accessed on March 20, 2024).
11. Karelskiy A.S. *Povyshenie tochnosti rezbofrezirovaniya na osnove snizheniya silovogo vzaimodeystviya instrumenta i zagotovki: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Improving accuracy of thread milling by reducing the force interaction between the tool and the workpiece. PhD thesis]. Moscow, 2022.
12. Malkov O.V., Karelskiy A.S. Modeling of the cut layer during thread milling. *Izvestiya vuzov. Mashinostroyeni* [News of Higher Educational Institutions. Mechanical Engineering]. 2017;(9):54-64. (In Russ.) DOI: 10.18698/0536-1044-2017-9-54-64

Поступила 28.03.2024; принята к публикации 21.06.2024; опубликована 30.09.2024  
Submitted 28/03/2024; revised 21/06/2024; published 30/09/2024

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

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

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

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



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)  
УДК 62-1  
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-3-101-112

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕКСТУРЫ ВОЛНИСТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ ШКИВОВ

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

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

**Аннотация.** Постановка задачи (актуальность работы). Несмотря на явное негативное влияние параметра волнистости на эксплуатационные свойства деталей, существуют передачи, для которых волнистость имеет положительное влияние. К таким передачам можно отнести фрикционные, в частности ремённую передачу вариатора. Наличие дополнительных волн оказывает влияние на коэффициент трения, что снижает проскальзывание ремня при высоких моментах, а также позволяет управлять этим явлением путём структурирования пятен контактного взаимодействия. Предварительное моделирование и исследование эксплуатационных характеристик и свойств волнистых текстур позволит уменьшить материальные и временные затраты на проведение натуральных экспериментов. Однако в настоящее время в открытой научно-технической литературе не встречаются адекватные и детально проработанные аналитические подходы для моделирования текстуры волнистости поверхности. В этой связи разработка математических моделей и аналитических подходов для моделирования 3D-текстур волнистости является актуальной задачей. **Цель работы.** Разработать аналитический подход для моделирования трёхмерных текстур волнистой поверхности шкива бесступенчатой трансмиссии при чистовом точении на основе функционального геометрического описания режущей кромки инструмента. **Используемые методы.** В данной работе теоретические исследования выполнены с использованием основных положений технологии машиностроения и математического анализа. **Новизна.** Предложена математическая зависимость волнистости поверхности шкива клиноремённой трансмиссии в виде системы кусочных функций, которая описывает геометрию режущей кромки резца. Предложена математическая модель формирования волнистости в процессе точения при условии отсутствия колебаний, в которой смещение резца рассматривается исключительно с геометрической точки зрения, обусловленной динамикой подачи резца, геометрией резца и глубиной резания. **Результат.** Предложен алгоритм геометрического моделирования текстуры волнистости шкива для дальнейшей реализации как в автоматизированной среде, так и аналитических расчётах, и получены модели волнистости для некоторых параметров режущего инструмента. **Практическая значимость.** Исследование направлено на повышение качества обработки и создание на поверхности шкивов клиноремённой трансмиссии микропрофиля с необходимой текстурой, что позволит уменьшить время обработки путём снижения количества технологических операций.

**Ключевые слова:** текстура поверхности, точение, волнистость, шкив, резец, математическая модель

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

### Для цитирования

Генералова А.А., Никулин А.А., Бычков Д.С. Моделирование текстуры волнистости поверхности при токарной обработке шкивов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №3. С. 101-112. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-101-112>



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

# MODELING THE TEXTURE OF A WAVY SURFACE DURING PULLEY TURNING

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

Penza State University, Penza, Russia

**Abstract. Problem Statement (Relevance).** Despite the obvious negative effect of the waviness parameter on the performance properties of parts, there are transmissions, where waviness has a positive effect. Such transmissions include friction transmissions, in particular, the belt drive of the continuously variable transmission. Additional waves influence the coefficient of friction, reducing belt slippage at high torque, and also control this phenomenon by structuring contact interaction spots. Preliminary modeling and examination of the performance characteristics and properties of wavy textures will reduce the material and time costs for conducting field experiments. However, currently available open scientific and technical literature does not contain appropriate or detailed analytical approaches to modeling the texture of surface waviness. In this regard, it is currently relevant to develop mathematical models and analytical approaches for modeling 3D waviness textures. **Objectives.** The research is aimed at developing an analytical approach to model 3D textures of a continuously variable transmission pulley wavy surface during finish lathe turning, using a functional geometrical description of the tool cutting edge. **Methods Applied.** The paper contains theoretical studies conducted by applying main provisions of the mechanical engineering technology and a mathematical analysis. **Originality.** The paper proposes the mathematical dependence between waviness of the V-belt transmission pulley surface as a system of piecewise functions that describes geometry of the tool cutting edge. The paper proposes a mathematical model of waviness formation in the turning process provided that there are no fluctuations, when the displacement of the cutter is considered exclusively from a geometric point of view characterized by dynamics of the cutter feed, cutter geometry and cutting depth. **Result.** The paper presents a proposed algorithm of geometric modeling of the pulley waviness texture to be used both in automatically controlled environment and analytical calculations, and developed models of waviness for some parameters of the cutting tool. **Practical Relevance.** The research is aimed at improving the quality of machining and forming the microprofile with the required texture on the V-belt transmission surface to decrease the machining time by reducing the number of technological operations.

**Keywords:** surface texture, turning, waviness, pulley, cutter, mathematical model

## For citation

Generalova A.A., Nikulin A.A., Bychkov D.S. Modeling the Texture of a Wavy Surface During Pulley Turning. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 3, pp. 101-112. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-101-112>

## Введение

Текстура поверхности, также известная как рельеф поверхности, – это природа поверхности, определяемая тремя характеристиками: слоистостью, шероховатостью поверхности и волнистостью. Текстура поверхности является одним из важных факторов, контролирующих трение. Каждый производственный процесс (например, многие виды механической обработки) создаёт текстуру поверхности. Выделяют следующие причины управления текстурой поверхности: увеличение срока службы компонентов, повышение сопротивления усталости, уменьшение износа при трении, уменьшение коррозии за счёт минимизации глубины неровностей [1, 2].

Шероховатость поверхности, часто сокращаемая до шероховатости, является компонентом текстуры поверхности. Она количественно определяется отклонением в направлении вектора нормали реальной поверхности от её идеальной формы [2-4]. Это вызвано неравномерностями в шероховатости поверхности. Если эти отклонения велики, поверхность шерохова-

тая, если они малы, поверхность гладкая. Шероховатость играет важную роль в определении того, как реальный объект будет взаимодействовать с окружающей средой. Шероховатая поверхность обычно изнашивается быстрее и имеет более высокие коэффициенты трения, чем гладкая. Шероховатость часто является хорошим показателем работоспособности механических компонентов, поскольку неровности поверхности могут образовывать очаги трещин или коррозии. Шероховатость также известна как первичная текстура.

Волнистость поверхности известна как вторичная текстура. Она возникает в результате таких факторов, как биение станка или заготовки, вибрации, дребезжание, термическая обработка или рабочие деформации [5-7]. Волнистость – это компонент шероховатости поверхности, на который накладывается шероховатость. Образование волнистости поверхности зависит от многих причин и далеко не так изучено, как образование микронеровностей. Этим параметром

геометрии поверхности не всегда удаётся управлять на практике [8-10].

В процессе точения заготовки возникают силы резания, которые вызывают упругую деформацию обрабатываемой системы, которая формируется станком, захватом, приспособлением и режущим инструментом (система СПИД) [11-13]. Значения деформации для отдельных элементов этой системы не являются постоянными, поскольку они зависят от применяемых параметров резания и других условий обработки, которые оказывают переменное воздействие на систему динамических сил. В результате переменных сил резания возникают вибрации обрабатываемой системы, которые существенно влияют на траекторию движения инструмента и деформацию заготовки. Вибрации в процессе обработки являются нежелательным явлением. Они приводят к ряду ошибок при изготовлении деталей.

Поскольку система СПИД динамична и пространственна, механические вибрации, генерируемые в этой системе, также пространственны. Компоненты колебаний в направлении, перпендикулярном обрабатываемой поверхности, существенно влияют на текстуру поверхности (шероховатость, волнистость и т.д.) [8-10, 14, 15], а компоненты, соответствующие направлению скорости резания, – на ошибки в продольном сечении, например конусность и отсутствие параллельности между внешней и внутренней поверхностями.

В данном исследовании предложен аналитический подход к формированию волнистости под воздействием работы резца (геометрических параметров и автоколебаний резца).

### Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования выбран автомобильный вариатор. Прежде всего вариатор является фрикционным механизмом, основным способом повышения эффективности его работы является изменение коэффициента трения в фрикционных парах. Одним из вариантов такой модернизации является создание регулярного микропрофиля на поверхности фрикционных шкивов, а именно волнистости [12, 16-18].

При обработке цилиндрических и конических деталей на токарном станке микропрофиль, образуемый на поверхности заготовки, представляет собой спираль. Спираль образуется за счёт перемещения инструмента и её шаг зависит от скорости вращения заготовки и подачи. Профиль спирали в продольном разрезе представляет собой гребешок, образованный заострённой частью резца. Геометрическими параметрами инструмента, влияющими на его формирование, являются главный и вспомогательный углы резца в плане, а также радиус заострения. На первом этапе главная и вспомогательная режущие кромки образуют гребень на заготовке. Далее при повороте детали на  $360^\circ$  инструмент перемещается за счёт подачи и срезаёт сегмент у предыдущего гребня

вспомогательной режущей кромкой. В результате углы гребней получаются равными углам в плане, а не равны углам наклона этих плоскостей. За счёт высокой подачи и частоты вращения такие остаточные гребни на поверхности заготовки могут пересекаться друг с другом, образуя волны, шаг которых зависит от значения подачи инструмента. Шкив вариатора представляет собой деталь сложной геометрической формы. Для токарной обработки ответственной поверхности применяется как продольная, так и поперечная подача, что говорит о необходимости детального рассмотрения формирования микрогеометрии (волнистости) поверхности [19, 20-24].

Колебания резца и заготовки происходят в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Одно из направлений совпадает с направлением подачи инструмента  $s$ , второе направление перпендикулярно поверхности резания, сонаправленное с тангенциальной осью разложения колебаний. Основным фактором, влияющим на микрогеометрию поверхности, является вектор направления и интенсивности относительных колебаний резца и заготовки.

Режущая часть резца состоит из двух рёбер резания, характеризующихся углами  $\alpha$  (главный угол в плане) и  $\beta$  (вспомогательный угол в плане), а также скругления между ними, характеризующегося величиной  $\rho$  (радиус скругления вершины резца).

В таком случае функцию геометрии резца можно представить в виде кусочной функции, состоящей из 3-х интервалов: двух лучей  $x$  и  $y$  и дуги окружности радиусом  $\rho$ . Уравнение окружности задаётся уравнением

$$\rho^2 = x^2 + y^2. \quad (1)$$

Отсюда следует

$$f(x) = \sqrt{\rho^2 - x^2}. \quad (2)$$

Это уравнение «верхней» полуокружности, окружность резца является «нижней» и смещена на  $\rho$  относительно начала координат. Интервал скругления справа ограничен величиной  $\rho \cdot \sin(\alpha)$  в силу того, что связан с углом наклона передней режущей кромки  $\alpha$ , а слева ограничен величиной  $-\rho \cdot \sin(\beta)$ , следовательно, уравнение луча справа задается уравнением

$$f(x) = x \cdot \operatorname{tg}(\alpha) + C, \quad \text{если } \rho \cdot \sin(\alpha) \leq x, \quad (3)$$

где величина  $C$  находится из следующего рассуждения:

$$C = \rho \cdot (1 - \cos(\alpha)) - \rho \cdot \sin(\alpha) \cdot \operatorname{tg}(\alpha). \quad (4)$$

Тогда уравнение луча имеет вид

$$f(x) = x \cdot \operatorname{tg}(\alpha) + \rho \cdot \left(1 - \frac{1}{\cos(\alpha)}\right), \quad \text{если } \rho \cdot \sin(\alpha) \leq x. \quad (5)$$

Уравнение второго луча выводится аналогично, с той лишь разницей, что он имеет иной наклон и поэтому имеет отрицательный знак:

$$f(x) = -x \cdot \operatorname{tg}(\beta) + \rho \cdot \left(1 - \frac{1}{\cos(\beta)}\right), \text{ если } x < -\rho \cdot \sin(\beta). \quad (5a)$$

Итоговое уравнение геометрии реза

$$f(x) = \begin{cases} -x \cdot \operatorname{tg}(\beta) + \rho \cdot \left(1 - \frac{1}{\cos(\beta)}\right), & \text{если } x < -\rho \cdot \sin(\beta) \\ \rho \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{x}{\rho}\right)^2}\right), & \text{если } -\rho \cdot \sin(\beta) \leq x < \rho \cdot \sin(\alpha) \\ x \cdot \operatorname{tg}(\alpha) + \rho \cdot \left(1 - \frac{1}{\cos(\alpha)}\right), & \text{если } \rho \cdot \sin(\alpha) \leq x \end{cases} \quad (6)$$

Результат работы уравнения (6) приведён на рис. 1. Построение кромки реза выполнено в системе автоматизированного моделирования MathCad 15.

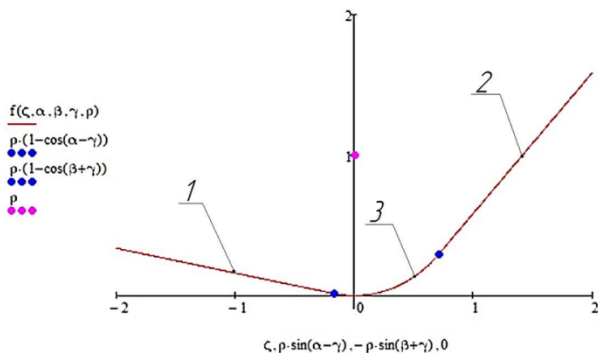


Рис. 1. Модель режущей кромки реза:

- 1 – вспомогательная режущая кромка ( $\beta = \frac{\pi}{10}$ );
- 2 – главная режущая кромка ( $\alpha = \frac{\pi}{4}$ );
- 3 – скругление режущей части ( $\rho = 1$ )

Fig. 1. A cutter cutting edge model: 1 is an auxiliary cutting edge ( $\beta = \frac{\pi}{10}$ ), 2 is a main cutting edge ( $\alpha = \frac{\pi}{4}$ ), 3 is rounding of the cutting part ( $\rho = 1$ )

Для удобства аналитической работы с функцией (6), описывающей геометрию реза, представляющей собой систему кусочных решений, предлагается записать формулу при помощи функции локализации на основе функции Хевисайда.

Как известно, функция Хевисайда  $\theta(x)$  выглядит следующим образом (7):

$$\theta(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

В качестве удобного приближенного выражения можно пользоваться следующим выражением:

$$\theta(x) = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{1}{1 + e^{-2k1x}}. \quad (7a)$$

Зададим обратную функцию Хевисайда  $\zeta(x)$  следующего вида:

$$\zeta(x) = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{1}{1 + e^{2k1x}}. \quad (7b)$$

Произведение этих функций со смещением аргумента позволяет выделить часть некоторой функции и гладко её совместить с другой функцией, это достигается благодаря такому свойству этих функций:

$$\theta(x) + \zeta(x) = 1, \quad \forall x \in \mathbb{R}. \quad (7b)$$

Окончательно получаем запись кусочной функции, описывающей геометрию реза с использованием функций Хевисайда:

$$f(x) = \left(-x \cdot \operatorname{tg}(\beta) + \rho \cdot \left(1 - \frac{1}{\cos(\beta)}\right)\right) \cdot \zeta(x + \rho \cdot \sin(\beta)) + \rho \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{x}{\rho}\right)^2}\right) \cdot \theta(x + \rho \cdot \sin(\beta)) \cdot \zeta(x - \rho \cdot \sin(\alpha)) + \left(x \cdot \operatorname{tg}(\alpha) + \rho \cdot \left(1 - \frac{1}{\cos(\alpha)}\right)\right) \cdot \theta(x - \rho \cdot \sin(\alpha)). \quad (8)$$

Такая форма записи позволяет гладко масштабировать решение и работать с этой формой как с непрерывной кривой, в отличие от задания функции геометрии реза в виде обычной кусочной функции. Более того, при должном подборе коэффициентов, удовлетворяющих поставленной задаче, можно добиться существенного сокращения записи, проделав все алгебраические операции по упрощению, что в современном мире можно возложить на аналитические системы математических пакетов программ имеющих в своём составе средства символьной обработки формул, в частности это такие инструменты, как MatchCad, Maple, Wolfram Mathematica или их аналоги в виде библиотек для символьной алгебры, например для языка Python.

### Аналитический подход к моделированию волнистой текстуры

Рассмотрим волнистость в отсутствие относительных колебаний реза и обрабатываемой заготовки. Смещение реза в таком случае носит чисто геометрический характер, обусловленный динамикой подачи реза, геометрией реза и глубиной резания (рис. 2).



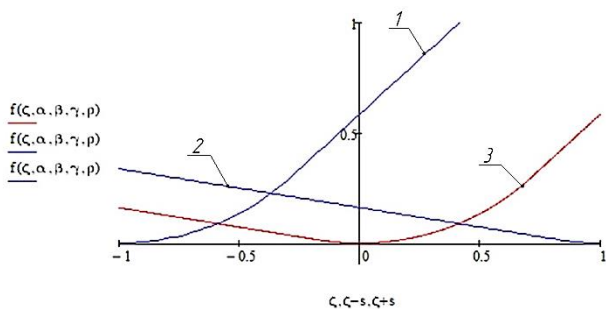


Рис. 2. Формирование волнистости в процессе резания при смещении реза: 1 – предыдущее положение режущей кромки реза; 2 – следующее положение вспомогательной кромки реза; 3 – текущее положение кромки реза

Fig. 2. Waviness formed during the cutting process when the cutter is displaced: 1 is a previous position of the cutting edge of the cutter, 2 is a next position of the auxiliary edge of the cutter, 3 is a current position of the cutter edge

Фактически получение профиля подобной волнистости (остаточного сечения среза) сводится к получению точки пересечения двух кривых:

– кривая, описывающая главную режущую кромку  $f_{SCEA}(x)$  (side cutting – edge angle):

$$f_{SCEA}(x) = \begin{cases} \rho \cdot \left( 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{x}{\rho} \right)^2} \right), & \text{если } 0 \leq x < \rho \cdot \sin(\alpha) \\ x \cdot \operatorname{tg}(\alpha) + \rho \cdot \left( 1 - \frac{1}{\cos(\alpha)} \right), & \text{если } \rho \cdot \sin(\alpha) \leq x \end{cases} \quad (9)$$

– кривая, описывающая вспомогательную режущую кромку (смещённую на величину подачи  $s$ )  $f_{ECEA}(x)$  (end cutting – adge angl):

$$f_{ECEA}(x) = \begin{cases} -x \cdot \operatorname{tg}(\beta) + \rho \cdot \left( 1 - \frac{1}{\cos(\beta)} \right), & \text{если } x < -\rho \cdot \sin(\beta) \\ \rho \cdot \left( 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{x}{\rho} \right)^2} \right), & \text{если } -\rho \cdot \sin(\beta) \leq x < 0 \end{cases} \quad (9a)$$

То есть алгебраически это эквивалентно решению следующего уравнения:

$$f_{SCEA}(x) = f_{ECEA}(x - s), \quad (9б)$$

схема пересечения изображена на рис. 3.

Учитывая тот факт, что функции  $f_{SCEA}(x)$  и  $f_{ECEA}(x)$  являются кусочными, необходимо проверить 4 условия для нахождения точки пересечения каждого из 2-х участков одной функции с каждым из 2-х участков другой функции:

– пересечение двух скруглений  $point_{cc}$ ;

- пересечение скругления с прямой  $point_{cp}$ ;
- пересечение прямой со скруглением  $point_{pc}$ ;
- пересечение двух прямых  $point_{pp}$ .

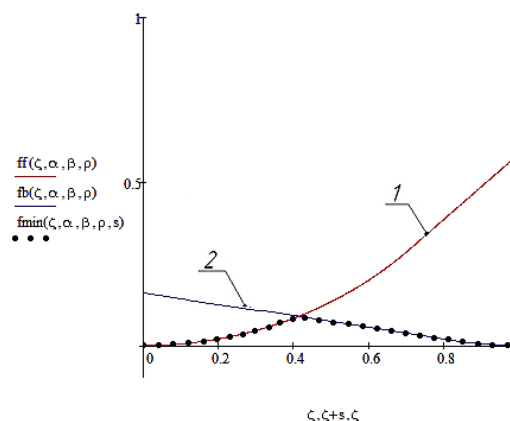


Рис. 3. Геометрическая модель формирования волны: 1 – след главной режущей кромки; 2 – след вспомогательной режущей кромки; ••• – профиль итоговой волнистости

Fig. 3. A geometric model of wave formation: 1 is a trace of the main cutting edge; 2 is a trace of the auxiliary cutting edge, ••• is a profile of final waviness

**Пересечение двух скруглений**, очевидно, возможно лишь в случае, когда минимальная из длин проекций этих скруглений на ось  $x$  больше или равна половине величины подачи режущего инструмента  $s$ .

Тогда, в силу того, что скругления образованы одной окружностью и достаточно велики, они пересекаются ровно на половине расстояния между ними, следовательно, точка пересечения двух скруглений  $point_{cc}$  определяется как

$$point_{cc} = \begin{cases} \left( \frac{s}{2}, \rho - \rho \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{s}{2 \cdot \rho} \right)^2} \right), & (10) \\ \text{если } \min(\sin(\alpha), \sin(\beta)) \geq \frac{s}{2 \cdot \rho}. \end{cases}$$

Схема пересечения изображена на рис. 4.

**Пересечение скругления с прямой** происходит в случае, если одна из проекций меньше половины подачи  $\sin(\alpha) < \frac{s}{2 \cdot \rho}$ , а вторая достаточно велика, чтобы касательная в точке окончания меньшего скругления могла пересечь большее скругление (рис. 5).

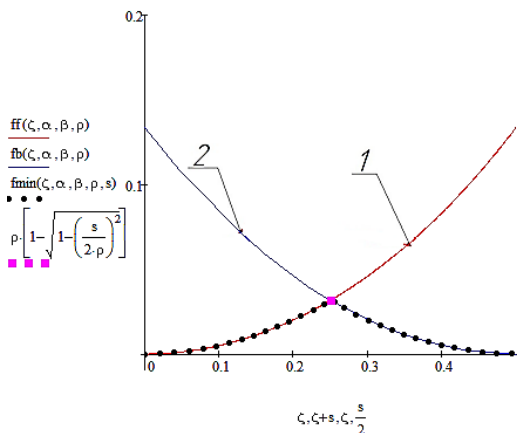


Рис. 4. Геометрическая модель формирования волны при пересечении двух скруглений: 1 – след главной режущей кромки; 2 – след вспомогательной режущей кромки; ••• – профиль итоговой волнистости; ■ – точка пересечения поверхностей резания

Fig. 4. A geometric model of wave formation at the intersection of two fillets: 1 is a trace of the main cutting edge; 2 is a trace of the auxiliary cutting edge, ••• is a profile of final waviness, ■ is a point of intersection of the cutting surfaces

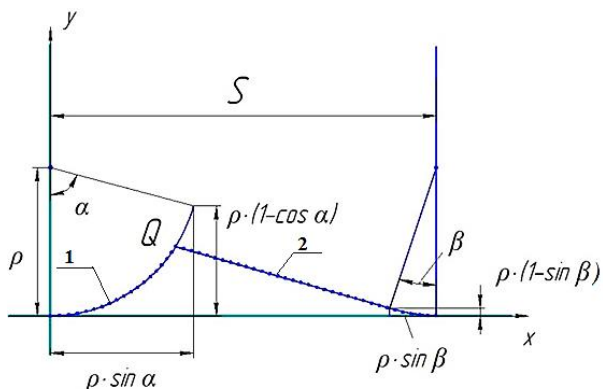


Рис. 5. Геометрическая модель формирования волны при пересечении скругления с прямой: 1 – след главной режущей кромки; 2 – след вспомогательной режущей кромки; s – величина подачи; ••• – профиль итоговой волнистости; ρ – радиус скругления вершины резца; α – угол наклона главной режущей кромки; β – угол наклона вспомогательной режущей кромки

Fig. 5. A geometric model of wave formation at the intersection of a rounding with a straight line: 1 is a trace of the main cutting edge; 2 is a trace of the auxiliary cutting edge, s is a feed value, ••• is a profile of final waviness, ρ is a radius of rounding of the tip of the cutter, α is an angle of inclination of the main cutting edge, β is an angle of inclination of the auxiliary cutting edge

Условие пересечения скругления с кусочной кривой выглядит следующим образом:

$$f_{ECEA}(s - \rho \cdot \sin(\alpha)) \leq \rho \cdot (1 - \cos(\alpha)). \quad (11)$$

В результате подстановки и тригонометрических вычислений получаем функцию, описывающую пересечение скругления с прямой:

$$\gamma = 2 \cdot \text{tg}^{-1} \left( \frac{\pm \sqrt{2 \cdot s \cdot \rho \cdot \sin(\beta) - s^2 \cdot \sin^2(\beta) - \rho \cdot \sin(\beta)}}{\rho \cdot \cos(\beta) - s \cdot \sin(\beta) + \rho} \right);$$

$$\text{point}_{cp} = \left( \begin{matrix} \rho \cdot \sin(\gamma) \\ \rho(1 - \cos(\gamma)) \end{matrix} \right), \text{ if } \frac{1 + \frac{s}{\rho} \cdot \sin(\beta) - \sin(\beta) \cdot \sin(\alpha)}{\cos(\beta) \cdot \cos(\alpha)} \geq 1. \quad (11a)$$

**Пересечение прямой со скруглением** аналогично случаю пересечения скругления с прямой и происходит в случае, если одна из проекций меньше половины подачи  $\sin(\beta) < \frac{s}{2 \cdot \rho}$ , а вторая достаточно велика,

чтобы касательная в точке окончания меньшего скругления могла пересечь большее скругление, то есть условие выглядит следующим образом:

$$f_{SCEA}(s - \rho \cdot \sin(\beta)) \leq \rho \cdot (1 - \cos(\beta)). \quad (12)$$

Аналогично имеем

$$x \cdot \text{tg} + \rho \cdot \left( 1 - \frac{1}{\cos(\alpha)} \right) \leq \rho \cdot (1 - \cos(\beta)), \quad (12a)$$

$$\frac{1 - \frac{s}{\rho} \sin(\alpha) + \sin(\beta) \sin(\alpha)}{\cos(\alpha) \cos(\beta)} \geq 1. \quad (12b)$$

Пересечение окружности с прямой эквивалентно решению следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} x_\gamma + \rho \cdot \sin(\gamma) = s, \\ x_\gamma \cdot \text{tg}(\alpha) + \rho \cdot \left( 1 - \frac{1}{\cos(\alpha)} \right) = \rho \cdot (1 - \cos(\gamma)). \end{cases} \quad (12b)$$

В результате тригонометрических вычислений получаем функцию, описывающую пересечение прямой со скруглением:

$$\gamma = 2 \cdot \text{tg}^{-1} \left( \frac{\pm \sqrt{2 \cdot s \cdot \rho \cdot \sin(\alpha) - s^2 \cdot \sin^2(\alpha) - \rho \cdot \sin(\alpha)}}{\rho \cdot \cos(\alpha) - s \cdot \sin(\alpha) + \rho} \right);$$

$$\text{point}_{pc} = \left( \begin{matrix} s - \rho \cdot \sin(\gamma) \\ \rho(1 - \cos(\gamma)) \end{matrix} \right), \text{ if } \frac{1 - \frac{s}{\rho} \sin(\alpha) + \sin(\beta) \sin(\alpha)}{\cos(\alpha) \cos(\beta)} \geq 1. \quad (12g)$$

**Пересечение двух прямых** происходит во всех остальных случаях и эквивалентно решению уравнения

$$x \cdot \tan(\alpha) + \rho \cdot \left(1 - \frac{1}{\cos(\alpha)}\right) = (s - x) \cdot \tan(\beta) + \rho \cdot \left(1 - \frac{1}{\cos(\beta)}\right), \quad (13)$$

выражая из которого  $x$ , получаем

$$x = \frac{s \cdot \tan(\beta) - \frac{\rho}{\cos(\beta)} + \frac{\rho}{\cos(\alpha)}}{\tan(\alpha) + \tan(\beta)}. \quad (13a)$$

В таком случае точка пересечения расположена по следующим координатам:

$$point_{pp} = \left( \begin{matrix} x \\ x \cdot \tan(\alpha) + \rho \cdot \left(1 - \frac{1}{\cos(\alpha)}\right) \end{matrix} \right). \quad (13b)$$

Схема пересечения двух прямых приведена на рис. 6.

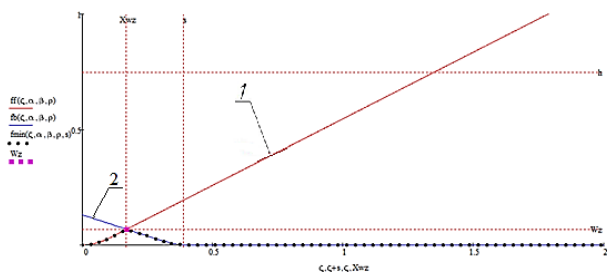


Рис. 6. Геометрическая модель формирования волны при пересечении двух прямых (на участке от 0 до  $s$ ): 1 – след главной режущей кромки; 2 – след вспомогательной режущей кромки; ••• – профиль итоговой волнистости; ■ – точка пересечения поверхностей резания

Fig. 6. A geometric model of wave formation at the intersection of two straight lines (in an area from 0 to  $s$ ): 1 is a trace of the main cutting edge; 2 is a trace of the auxiliary cutting edge, ••• is a profile of final waviness, ■ is a point of intersection of the cutting surfaces

Примение формулы 13.2 многократно даёт возможность получить форму геометрической волнистости поверхности в виде волнограммы, рассчитанную на произвольном участке и зависящую от: углов наклона режущих кромок (углы  $\alpha$  и  $\beta$ ), угла наклона резца в плане, радиуса скругления вершины резца  $\rho$ , величины подачи  $s$ .

Предложенное аналитическое описание геометрии резца позволяет перейти к моделированию структуры формируемой поверхности. Такое структурирование позволит изучать эксплуатационные показатели поверхности, контактное взаимодействие, автоматизировать и оптимизировать процесс обработки [25-27].

Полученные результаты и их обсуждение

В данном исследовании подробно описывается построение модели структуры волнистости поверхности. Расчёт моделирования производился путём аппроксимации квадратной решёткой спиралевидной траектории резца, дискретизированной равными интервалами времени, в каждом из которых вычислялось абсолютное смещение резца и относительные смещения колебаний в радиальной плоскости, индуцированной локальным базисом, состоящим из вектора оси вращения шкива и циркулярно-изменяющегося вектора направления подачи. Процедура геометрического моделирования обработки металла резанием в среде MathCad 15 показана на рис. 7.

```

Model(Img, Scale, Shift, Φ, T, K, dt) :=
a ← rows(Img)
b ← cols(Img)
for t ∈ 0, dt.. T
    φ ← mod(φ₀ + ω · t, 2π)
    if φ₁ < if(φ < π, φ, 2π - φ) ≤ Φ₀
        S ← A · sin(χ · t) · sin(γ)
        l ← R - s · ω · t + S
        break if l < r
        for k ∈ -K..K
            if R > (1 + k · dl) ≥ r
                y ← (1 + k · dl) · sin(φ)
                x ← (1 + k · dl) · cos(φ)
                i ← ceil(y · Scale) + Shift₁
                j ← ceil(x · Scale) + Shift₀
                if (a > i ≥ 0) ∧ (b > j ≥ 0)
                    Q ← A · sin(χ · t) · cos(γ) + f(-k · dl, α, β, γ, ρ) - h₁
                    Imgᵢ,ⱼ ← Q if Q < Imgᵢ,ⱼ
    end for
end for

```

Рис. 7. Процедура геометрического моделирования волнистости в автоматизированной среде MathCad 15

Fig. 7. The procedure for geometric modeling of waviness in MathCad 15 automated environment

Модель резания  $Model(Img, Scale, Shift, \Phi, T, K, dt)$  производит геометрическое моделирование обработки поверхности металла резцом под действием колебаний. Программа выводит результат моделирования на изображении  $Img$  с масштабом  $Scale$ , смещением  $Shift$ , а также с ограничением по углам моделирования  $\Phi$ , максимальным временем моделирования  $T$ , качеством моделирования резца (количеством точек на резце)  $K$  и дискретностью времени  $dt$ .

Программа стартует с предварительного определения размера входного изображения встроенными функциями  $rows(M)$  – возвращающей количество строк матрицы  $M$  и  $cols(M)$  – возвращающей количество столбцов матрицы  $M$ :  $a \leftarrow rows(Img)$  и  $b \leftarrow cols(Img)$ . Далее в цикле перебирается время  $t$ , от 0 до  $T$  через  $dt$ .

При этом угол  $\phi$  вычисляется по следующей формуле:

$$\phi = \phi_0 + \omega \cdot t \quad \text{mod}(2\pi), \quad (14)$$

где  $\varphi$  – угол положения резца на шкиве в момент времени  $t$ , рад;  $\varphi_0$  – начальный угол положения резца на шкиве, рад;  $\omega$  – угловая скорость вращения шкива, рад/с;  $t$  – время, с.

Важно отметить, что угол вычисляется по модулю  $2\pi$ , то есть в пределах одной окружности. Если текущий угол лежит в диапазоне интересующих углов  $\Phi_1 < if(\varphi < \pi, \varphi, 2\pi - \varphi) \leq \Phi_0$ , где  $if(a, b, c)$  – тернарный оператор сравнения, то производится симуляция резания по алгоритму, описанному ниже.

1. Шаг первый. Вычисляется величина динамического изменения подачи  $S$ , связанная с геометрическими особенностями позиционирования резца относительно нормали к поверхности обработки, по формуле

$$S = A \cdot \sin(\chi \cdot t) \cdot \sin(\gamma), \quad (15)$$

где  $A$  – амплитуда относительных колебаний резца и шкива, мм;  $\chi$  – частота относительных колебаний резца и шкива вдоль резца, Гц;  $\gamma$  – угол наклона резца к поверхности резания, рад.

Формула (15) позволяет вычислить проекцию смещения резца под действием колебаний с определённой амплитудой и частотой на поверхность резания (образующую шкива) под углом  $\gamma$ . Ортогональная проекция суммарного смещения резца в каждый момент времени под действием колебаний вычисляется чуть дальше по ходу вычислений с целью оптимизации расчётов.

2. Шаг второй. Вычисляется смещение  $l$  резца вдоль образующей по формуле

$$l = R - s \cdot \omega \cdot t + S, \quad (16)$$

где  $l$  – смещение резца вдоль образующей от оси вращения шкива, мм;  $R$  – внешний радиус шкива, мм;  $s$  – подача резца, мм/об;  $\omega$  – угловая скорость вращения шкива, об/с;  $t$  – время, с;  $S$  – динамическое изменение подачи, обусловленное геометрией позиционирования резца и колебаниями, мм.

3. Шаг третий. Если текущее смещение резца вышло за пределы шкива (внутреннего радиуса  $r$ ), то моделирование останавливается. В противном случае моделирование продолжается. В силу того, что моделируется вырезание металла резцом, аналитическое представление резца разбивается на сегменты размером  $dl$  в количестве  $K$  штук ( $K$  штук в каждую сторону, так что получается  $2K - 1$  точек по длине всего резца) и в цикле вычисляется высота каждой точки  $k$  над поверхностью обработки, направление резания ортогонально плоскости изображения, подача  $s$  осуществляется вдоль  $l$  в противоположном направлении.

Текущая точка резца  $k$ , смещённого на величину  $l$ , определяется в соответствии с условием

$$R > l + k \cdot dl \geq r. \quad (17)$$

Если текущая расчётная точка  $k$  находится внутри области диска, то положение  $(x, y)$  этой точки вычисляется в декартовых координатах:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = (l + k \cdot dl) \begin{pmatrix} \cos(\varphi) \\ \sin(\varphi) \end{pmatrix}. \quad (18)$$

Далее положение (18) преобразуется в индексы  $(i, j)$  элемента матрицы (изображение  $Img$ ), пользуясь встроенной функцией  $\text{ceil}(x)$ , округляющей  $x$  до ближайшего большего целого числа:

$$\begin{pmatrix} j \\ i \end{pmatrix} = \text{ceil} \left( \text{Scale} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \right) + \text{Shift}.$$

Если полученные индексы не выходят за пределы изображения  $(a > i \geq 0) \wedge (b > j \geq 0)$ , вычисляется главная величина  $Q$  – глубина положения точки  $k$  резца под обрабатываемой поверхностью по следующей формуле:

$$Q = A \cdot \sin(\chi \cdot t) \cos(\gamma) + f(-k \cdot dl, \alpha, \beta, \gamma, \rho) - h1, \quad (19)$$

где  $h1$  – глубина резания, мм.

В формуле (19) первое слагаемое отвечает за относительные колебания резца и заготовки, второе слагаемое отвечает за форму смещённого резца и третье слагаемое – это величина заглупления резца (глубина резания). Стоит отметить, что здесь в качестве координаты на резце применяется величина  $-k \cdot dl$ . Это связано с тем, что величина  $l$  отсчитывается от оси вращения шкива (в полярных координатах) наружу, а подача осуществляется с внешней части диска – периферии – внутрь, что означает движение к центру, то есть против отсчёта величины  $l$ , следовательно, режущая кромка, направленная в сторону центральной части, главная режущая кромка должна отсчитываться с отрицательным знаком, то есть направленной против направления отсчёта величины  $l$  (так как главная режущая кромка, снимая металл, уменьшает эту величину, двигаясь от периферии к центру).

Если вычисленная глубина  $Q$  в ячейке с индексами  $(i, j)$  оказалась меньше, чем величина, записанная в ней в текущий момент, это значит, что из этой ячейки был вырезан металл и ячейка обновляется – в неё записывается новая глубина:

$$Img_{i,j} \leftarrow Q, \text{ если } Q < Img_{i,j}.$$

Так, шаг за шагом для каждого момента времени, каждого положения резца и каждой его точки (сегмента) обновляется глубина врезания в поверхность обработки, оставляя минимальную после всех проходов резца.

В результате получаем поверхность, обработанную резцом, движущимся под действием подачи и колебаний (рис. 8) на ограниченном участке со следующими характеристиками: масштабный фактор

$$Scale = 8, \text{ смещения по индексам } Shift = \begin{pmatrix} -350 \\ 200 \end{pmatrix},$$

ограничения по углам  $\Phi = \begin{pmatrix} \pi/10 \\ -\pi/10 \end{pmatrix}$ , максимальное

время  $T = 600$  с, количество точек на резце  $K = 40$  (с дискретностью  $dl = 0,05$  мм), дискретность времени моделирования  $dt = 0,00005$  с, обработка шкива с частотой относительных колебаний  $\chi = 5,5$  Гц. Здесь тёмные области самые глубокие, а светлые – самые высокие, такая карта высот может при необходимости быть легко переведена в 3D-график.

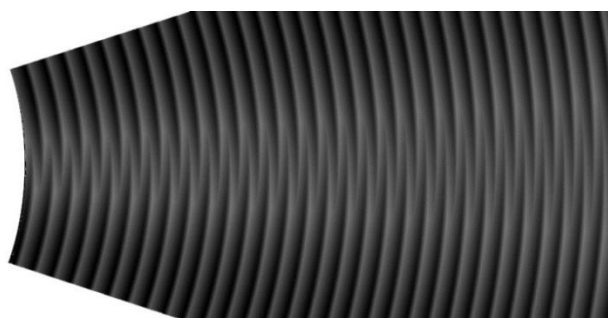


Рис. 8. Пример результата работы программы моделирования для «холста»  $800 \times 400$

Fig. 8. An example of the result of the modeling program for the “canvas” of  $800 \times 400$

Также программа позволяет вычислить общий вид обработанного шкива путём подбора соответствующего масштаба для того, чтобы весь шкив мог быть изображён на передаваемом в программу «холсте», размер которого задаётся пользователем исходя из предоставляемых ему вычислительных мощностей и времени расчёта.

Разработанный алгоритм моделирования структуры волнистости поверхности может быть рассмотрен как основа для моделирования и построения множества трёхмерных текстур поверхности, обладающих, прежде всего, волнистостью. Принятые допущения не оказывают существенного влияния на достоверность моделируемой структуры.

### Заключение

Таким образом, в данной статье предложен аналитический подход для моделирования режущей кромки резца. В рамках предложенного подхода получена математическая зависимость в виде системы кусочных решений, также получена запись кусочной функции, описывающей геометрию резца с использованием функций Хевисайда, придающей кусочной функции непрерывный вид. Предложена математическая модель формирования волнистости в процессе резания в отсутствие колебаний, в которой смещение

резца рассматривается исключительно с геометрической точки зрения, обусловленной динамикой подачи резца, частотами колебаний резца и вращения заготовки, геометрией резца и глубиной резания. В рамках предложенной математической модели рассмотрены четыре условия определения точки пересечения элементов следа резца: пересечение двух скруглений, пересечение скругления с прямой, пересечение прямой со скруглением, пересечение двух прямых. Предложен алгоритм геометрического моделирования волнистости и программа на его основе в автоматизированной среде и получены карты высот текстуры волнистости для конических шкивов при некоторых параметрах.

### Список источников

1. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000. 320 с.
2. Абрамов А.Д., Носов Н.В., Ладягин Р.В. Разработка методики построения трехмерного изображения структуры поверхности деталей по их профилограммам // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. №2. С. 230-240.
3. Демкин Н.Б., Измайлов В.В. Зависимость эксплуатационных свойств фрикционного контакта от микрогеометрии контактирующих поверхностей // Трение и износ. 2010. Т. 31. №1. С. 68-77.
4. Рачишкин А.А., Сутягин О.В., Болотов А.Н. Компьютерное моделирование структуры технических поверхностей на микроуровне // Программные продукты и системы. 2018. №4. С. 829-832. DOI: 10.15827/0236-235X.031.4.829-832
5. Multi scale modal decomposition of primary form, waviness and roughness of surfaces / Goic GL, Favrelière H, Samper S, Formosa F. // Scanning. 2011, vol. 33, pp. 332-41. DOI: 10.1002/sca.20253
6. Dynamic characterization of machining systems / Zapciu M. et al. // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2011, no. 57, pp. 73-83. DOI: 10.1007/s00170-011-3277-7
7. Соколовский А.П. Жесткость в технологии машиностроения. М.; Л.: Изд. и 1-я тип. Машгиза в Лгр., 1946. 207 с.
8. Лоповок Т.С. Волнистость поверхности и ее измерение. М.: Изд-во стандартов, 1973. 184 с.
9. Витвинов М.К. Технологическое наследование волнистости на операциях механической обработки на примере фрезерования и плоского шлифования: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.07. Новосибирск, 2015.
10. Белов Е.Б. Уменьшение волнистости поверхности при точении за счет прогнозирования и снижения уровня автоколебаний: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.07. Севастополь, 2017.
11. Кедров С.С. Колебания металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1978. 199 с.
12. Генералова А.А., Зверовщиков А.Е., Никулин А.А. Влияние автоколебаний в процессе токарной обработки на формирование волнистости шкивов автомобильных вариаторов // Известия высших

- учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2022. №4. С. 108-121. DOI: 10.21685/2072-3059-2022-4-9
13. Displacements Analysis of Self-Excited Vibrations in Turning / Bisu C.D. et al. // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2009, vol. 44, no. 1-2, pp. 1-16.
  14. Experimental Investigation of Tool Lifespan Evolution During Turning Operation Based on the New Spectral Indicator  $OL_{mod}$ . / Babouri M.K., Ouelaa N., Djamaa M.C. et al. // *J. Vib. Eng. Technol.* 2024, no. 12, pp. 5455–5473. <https://doi.org/10.1007/s42417-023-01175-1>
  15. Шелковой А.Н., Мироненко Е.В., Ключко А.А. Критерии формирования структур и параметров систем обработки, обеспечивающих заданные эксплуатационные свойства закаленных крупномодульных зубчатых колес // *Сучасні технології в машинобудуванні*. 2013. №8. С. 185-200.
  16. Research on Improvement of Transmission Efficiency by Improving Friction Coefficient Between Elements and Pulleys of a Belt CVT / Yamazaki M., Kato Y., Nakahara T., Ichihashi T. // *Review of automotive engineering*. 2008, vol. 29, pp. 485-492.
  17. Yagyaev E., Shron L., Meniuk D. Increasing the operational reliability of car variators due to creating regular surface microrelief by laser ablation // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2020, vol. 889, 012007.
  18. Generalova A., Zverovshchikov A., Nikulin A. Surface undulation parameters of continuously variable transmission friction during turning // *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2022.06.001>.
  19. Generalova A.A., Nikulin A.A. Increasing the Vehicle's Dynamic Performance by Developing a Continuously Variable Transmission // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2019, vol. 14, no. 18, pp. 6866-6875.
  20. Zverovshchikov A.E., Generalova A.A., Nikulin A.A. Ensuring the performance characteristics of a friction V-belt variator // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020, vol. 16979, 042079.
  21. Генералова А.А., Никулин А.А. Разработка процесса изготовления шкива бесступенчатой трансмиссии легкового автомобиля // *Наука и бизнес: Пути развития*. 2019. №1. С. 21-26.
  22. Генералова А.А., Зверовщиков А.Е., Никулин А.А. Исследование влияния микропрофиля фрикционных элементов вариатора на коэффициент трения в зоне контакта и коэффициент полезного действия передачи // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. 2023. №3. С. 154-172. DOI: 10.21685/2072-3059-2023-3-12
  23. Генералова А.А., Никулин А.А., Бычков Д.С. Аналитическое исследование характеристик стойкости инструмента и автоколебаний при токарной обработке шкивов // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2024. Т. 22. №1. С. 61-75. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-61-75>
  24. Исследование плазменно-дуговой резки низколегированной стали 09Г2С / Михайлищын С.В., Шекшеев М.А., Аюбашев О.М., Стебляно В.Л., Федосеев С.А. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2017. Т. 15. №2. С. 48-53. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-2-48-53>
  25. Тихомиров В.П., Измеров М.А. Влияние волнистости и шероховатости поверхности на нормальную контактную жесткость плоского стыка // *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2019. №12. С. 4-12. DOI: 10.30987/1999-8775-2019-2019-12-4-12
  26. Уменьшение теплового сопротивления между корпусом силового полупроводникового прибора и его радиатором / Тихомиров В.П., Воробьев В.И., Измеров М.А., Стрекалов Н.Н., Пугачев А.А. // *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2017. №2. С. 104-113. DOI: 10.12737/article\_59353e29a48eb2.21116479 (дата обращения: 31.05.2023).
  27. Мирошниченко И.В. Формирование математической модели волнистости по результатам вычисления шероховатости протяженных изделий // *Технологический аудит и резервы производства*. 2014. Т. 2. №1(16). С. 11-15.

#### References

1. Suslov A.G. *Kachestvo poverkhnostnogo sloya detaley mashin* [The quality of the surface layer of machine parts]. Moscow: Mashinostroenie, 2000, 320 p. (In Russ.)
2. Abramov A.D., Nosov N.V., Ladyagin R.V. Development of a method for constructing a 3D image of the surface structure of parts based on their profilograms. *iPolytech Journal*. 2023;27(2):230-240. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-230-240>
3. Demkin N.B., Izmaylov V.V. The relation between the friction contact performance and microgeometry of contacting surfaces. *Trenie i iznos* [Friction and Wear]. 2010;31(1):68-77. (In Russ.)
4. Rachishkin A.A., Sutyagin O.V., Bolotov A.N. Computer simulation of engineering surface structure at the micro-level. *Programmnye produkty i sistemy* [Software & Systems]. 2018;(4):829-832. (In Russ.) DOI: 10.15827/0236-235X.031.4.829-832
5. Goic G.L., Favrelière H., Samper S., Formosa F. Multi scale modal decomposition of primary form, waviness and roughness of surfaces. *Scanning*. 2011;33:332–41. DOI:10.1002/sca.20253
6. Zapciu M. et al. Dynamic characterization of machining systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2011;(57):73-83. DOI: 10.1007/s00170-011-3277-7

7. Sokolovskii A.P. *Zhestkost v tekhnologii mashinostroeniya* [Rigidity in mechanical engineering technology]. Moscow, Leningrad: Mashgiz Printing House 1 in Leningrad, 1946, 207 p. (In Russ.)
8. Lopovok T.S. *Volnistost poverkhnosti i ee izmerenie* [Surface waviness and its measurement]. Moscow: Publishing House of Standards, 1973, 184 p. (In Russ.)
9. Vitvinov M.K. *Tekhnologicheskoe nasledovanie volnistosti na operatsiyakh mekhanicheskoy obrabotki na primere frezerovaniya i ploskogo shlifovaniya: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Technological inheritance of waviness in machining operations using the example of milling and surface grinding. PhD (Eng.) thesis]. Novosibirsk, 2015.
10. Belov E.B. *Umenshenie volnistosti poverkhnosti pri tochenii za schet prognozirovaniya i snizheniya urovnya avtokolebaniy: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Reducing surface waviness during lathe turning by predicting and reducing self-oscillations. PhD (Eng.) thesis]. Sevastopol, 2017.
11. Kedrov S.S. *Kolebaniya metallorezhushchikh stankov* [Vibrations of metal-cutting machines]. Moscow: Mashinostroenie, 1978, 199 p. (In Russ.)
12. Generalova A.A., Zverovshchikov A.E., Nikulin A.A. The influence of self-oscillations in the turning process on the formation of waviness of pulleys of automobile variators. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [News of Higher Educational Institutions. Volga Region. Technical Sciences]. 2022;(4):108-121. DOI: 10.21685/2072-3059-2022-4-9 (In Russ.)
13. Bisu C.D. et al. Displacements analysis of self-excited vibrations in turning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2009;44(1-2):1-16.
14. Babouri M.K., Ouelaa N., Djamaa M.C. et al. Experimental Investigation of Tool Lifespan Evolution During Turning Operation Based on the New Spectral Indicator  $OL_{mod}$ . *J. Vib. Eng. Technol.* 2024;(12):5455–5473. <https://doi.org/10.1007/s42417-023-01175-1>
15. Shelkovoy A.N., Mironenko E.V., Klochko A.A. Criteria for the formation of structures and parameters of processing systems ensuring the specified performance properties of hardened coarse-grained gears. *Suchasni tekhnologii v mashinobuduvanni* [Modern Technologies in Mechanical Engineering]. 2013;(8):185-200. (In Russ.)
16. Yamazaki M., Kato Y., Nakahara T., Ichihashi T. Research on improvement of transmission efficiency by improving friction coefficient between elements and pulleys of a belt CVT. *Review of Automotive Engineering*. 2008;29:485-492.
17. Yagyaev E., Shron L., Meniuk D. Increasing the operational reliability of car variators due to creating regular surface microrelief by laser ablation. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2020;889:Article ID 012007.
18. Generalova A., Zverovshchikov A., Nikulin A. Surface undulation parameters of continuously variable transmission friction during turning. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2022.06.001>
19. Generalova A.A., Nikulin A.A. Increasing the vehicle's dynamic performance by developing a continuously variable transmission. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2019;14(18):6866-6875.
20. Zverovshchikov A.E., Generalova A.A., Nikulin A.A. Ensuring the performance characteristics of a friction V-belt variator. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;16979:Article ID 042079.
21. Generalova A.A., Nikulin A.A. Development of a process for manufacturing a pulley for a continuously variable transmission of a passenger car. *Nauka i biznes: Puti razvitiya* [Science and Business: Paths of Development]. 2019;(1):21-26. (In Russ.)
22. Generalova A.A., Zverovshchikov A.E., Nikulin A.A. Study on the effect of the microprofile of the CVT friction elements on the coefficient of friction in the contact zone and the efficiency factor of the transmission. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [News of Higher Educational Institutions. Volga Region. Technical Sciences]. 2023;(3):154-172. (In Russ.) DOI: 10.21685/2072-3059-2023-3-12
23. Generalova A.A., Nikulin A.A., Bychkov D.S. Analytical study on the characteristics of tool durability and self-oscillations during pulley turning. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024;22(1):61-75. (In Russ.) <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-61-75>
24. Mikhaylitsyn S.V., Sheksheev M.A., Ayubashev O.M., Steblyanko V.L., Fedoseev S.A. Study on plasma arc cutting of low-alloyed steel grade 09G2S. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2017;15(2):48-53. (In Russ.) <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-2-48-53>
25. Tikhomirov V.P., Izmerov M.A. Effect of waviness and surface roughness on the normal contact stiffness of a flat joint. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Bryansk State Technical University]. 2019;(12):4-12. (In Russ.) DOI: 10.30987/1999-8775-2019-2019-12-4-12
26. Tikhomirov V.P., Vorobev V.I., Izmerov M.A., Strekalov N.N., Pugachev A.A. Reducing thermal resistance between the body of a power semiconductor and its radiator. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Bryansk State Technical University]. 2017;(2):104-113. (In Russ.) DOI: 10.12737/article\_59353e29a48eb2.21116479 (Accessed on 31.05.2023)
27. Miroshnichenko I.V. Building a mathematical model of waviness based on the results of calculating roughness of long products. *Tekhnologicheskii audit i rezervy proizvodstva* [Technological Audit and Production Reserves]. 2014;2(1(16)):11-15. (In Russ.)

Поступила 11.02.2024; принята к публикации 10.06.2024; опубликована 30.09.2024  
Submitted 11/02/2024; revised 10/06/2024; published 30/09/2024

**Генералова Александра Александровна** – кандидат технических наук, доцент,  
Пензенский государственный университет, Пенза, Россия.  
Email: generalova\_aa@mail.ru. ORCID 0000-0002-3900-619X

**Никulin Артём Анатольевич** – инженер-исследователь,  
Пензенский государственный университет, Пенза, Россия.  
Email: artem.nikulin2003@yandex.ru. ORCID 0000-0003-1834-6053

**Бычков Дмитрий Сергеевич** – инженер-исследователь,  
Пензенский государственный университет, Пенза, Россия.  
Email: deciptikon@mail.ru. ORCID 0000-0003-1648-2289

**Aleksandra A. Generalova** – PhD (Eng.), Associate Professor,  
Penza State University, Penza, Russia.  
Email: generalova\_aa@mail.ru. ORCID 0000-0002-3900-619X

**Artem A. Nikulin** – Researcher Engineer,  
Penza State University, Penza, Russia.  
Email: artem.nikulin2003@yandex.ru. ORCID 0000-0003-1834-6053

**Dmitriy S. Bychkov** – Researcher Engineer,  
Penza State University, Penza, Russia.  
Email: deciptikon@mail.ru. ORCID 0000-0003-1648-2289



# МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

## MATERIALS SCIENCE AND HEAT TREATMENT OF METALS

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)  
УДК 621.791.92  
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-3-113-120



### СТРУКТУРА И СВОЙСТВА БЫСТРОРЕЖУЩЕГО СПЛАВА P2M9ЮАТ ПОСЛЕ НАПЛАВКИ И ОТПУСКА

Емелюшин А.Н.<sup>1</sup>, Миненко С.С.<sup>2</sup>, Громов В.Е.<sup>2</sup>, Чапайкин А.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

<sup>2</sup> Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

**Аннотация.** Методами современного физического материаловедения исследованы структура и свойства быстрорежущей стали P2M9ЮАТ, сформированной плазменной наплавкой в азоте на заготовку из стали 30ХГСА. Образцы наплавляли плазменной дугой на обратной полярности с подачей на сварочную ванну нетоковедущей присадочной порошковой проволоки ПП-P2M9ЮАТ. Структура наплавленного сплава в состоянии после наплавки характерна для литых и наплавленных сплавов: мартенсит, остаточный аустенит и карбиды. Первичные ячейки мартенситно-аустенитной смеси окружены развитой сеткой ледебуритной эвтектики пластинчатой и скелетной морфологии. Зарождение обеих эвтектик может быть связано с частичным модифицированием карбидной фазы за счет легирования азотом. Распределение микротвердости наплавленного слоя характеризуется значительной неоднородностью. Это объясняется сложным характером термического воздействия в условиях многослойной плазменной наплавки. После окончания наплавки заготовку подвергали высокотемпературному отпуску: температура нагрева 560-580°C, время выдержки 1 ч, количество отпусков 4. Четырехкратный высокотемпературный отпуск приводит к превращению остаточного аустенита, выделению карбидов и карбонитридов. Ледебуритная эвтектика частично растворяется, в результате чего разрушается эвтектический каркас, что благоприятно сказывается на прочностных характеристиках. Число круглых карбидных образований в стыках кристаллов снижается. Микротвердость наплавленного металла после отпуска возрастает от 6,89 до 7,48 ГПа, а ее распределение становится более равномерным. Установлено, что в наплавленном металле основными фазами после высокотемпературного отпуска являются твердый раствор  $\alpha$ -железа, карбиды и карбонитриды на основе железа, вольфрама, молибдена, хрома, алюминия и титана.

**Ключевые слова:** плазменная наплавка, порошковая проволока, азот, микротвердость, быстрорежущий сплав, микроструктура

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00186, <https://rscf.ru/project/23-19-00186>. Наплавка проведена с использованием оборудования научной лаборатории электровзрывного напыления высоконадежных покрытий ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет».*

© Емелюшин А.Н., Миненко С.С., Громов В.Е., Чапайкин А.С., 2024

#### Для цитирования

Структура и свойства быстрорежущего сплава P2M9ЮАТ после наплавки и отпуска / Емелюшин А.Н., Миненко С.С., Громов В.Е., Чапайкин А.С. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №3. С. 113-120. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-113-120>



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

## STRUCTURE AND PROPERTIES OF HIGH SPEED STEEL R2M9YUAT AFTER SURFACING AND TEMPERING

Emelyushin A.N.<sup>1</sup>, Minenko S.S.<sup>2</sup>, Gromov V.E.<sup>2</sup>, Chapaikin A.S.<sup>2</sup><sup>1</sup> Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia<sup>2</sup> Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

**Abstract.** The methods of modern physical materials science were used to study the structure and properties of high speed steel R2M9YuAT formed by plasma surfacing in nitrogen on a workpiece of 30KhGSA steel. The samples were surfaced by a plasma arc at reverse polarity with the supply of non-current-carrying filler flux-cored wire PP-R2M9YuAT to the weld pool. The alloy structure after surfacing is characteristic of cast and surfaced alloys: martensite, retained austenite and carbides. The primary cells of the martensite-austenitic mixture are surrounded by a developed network of ledeburite eutectic with lamellar and skeleton morphology. The nucleation of both eutectics can be associated with a partial modification of the carbide phase due to alloying with nitrogen. The microhardness distribution of the surfaced layer is characterized by significant heterogeneity. This is explained by the complex nature of the thermal effect under conditions of multilayer plasma surfacing. Upon completion of surfacing, the workpiece was subjected to high-temperature tempering: heating temperature was 560-580°C, holding time was 1 hour, and a number of tempering operations was 4. Four-time high-temperature tempering leads to the transformation of retained austenite and the precipitation of carbides and carbonitrides. Ledeburite eutectic partially dissolves, resulting in the destroyed eutectic framework, which has a beneficial effect on the strength characteristics. The number of round carbide formations at crystal junctions decreases. Microhardness of the surfaced metal after tempering increases from 6.89 GPa to 7.48 GPa, and its distribution becomes more uniform. It has been established that the main phases in the surfaced metal after high-temperature tempering are a solid solution of  $\alpha$ -iron, carbides and carbonitrides based on iron, tungsten, molybdenum, chromium, aluminum and titanium.

**Keywords:** plasma surfacing, flux-cored wire, nitrogen, microhardness, high speed alloy, microstructure

The research was funded by the grant of the Russian Science Foundation, No. 23-19-00186, <https://rscf.ru/project/23-19-00186>. The surfacing was carried out using the equipment of the scientific laboratory of electro-explosive spraying of highly reliable coatings at Siberian State Industrial University.

**For citation**

Emelyushin A.N., Minenko S.S., Gromov V.E., Chapaikin A.S. Structure and Properties of High Speed Steel R2M9YUAT after Surfacing and Tempering. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 3, pp. 113-120. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-113-120>

**Введение**

Для деталей машин и механизмов металлургического оборудования, работающих в условиях абразивного износа и высоких температур, широко применяются быстрорежущие стали P18, P12, P9 и др. В последние годы наметилась тенденция замены вольфрамовых сталей вольфрамомолибденовыми и молибденовыми экономнолегированными сталями, дополнительно легированными азотом и ванадием (P6M5, P8M3, P6M3 и типа M8, M10 (по марочнику США) и P2M8). В этих сталях вольфрам заменяется более дешевым и доступным молибденом в соотношении Mo:W = 1:(1,4-1,5). Легирование азотом быстрорежущих сталей позволяет повысить их отпускостойчивость и износостойкость при повышенных температурах. Высокие служебные характеристики такие быстрорежущие стали приобретают после сложной термической обработки (закалка с высокими температурами  $t_{\text{зак}} = 1220-1270^\circ\text{C}$  и высокотемпературный трехкратный отпуск  $t_{\text{отп.}} = 560-580^\circ\text{C}$ ). Прове-

дение такой термической обработки деталей из теплостойких сталей вызывает технологические трудности и приводит к значительному удорожанию таких деталей. Выплавка быстрорежущих сталей с повышенным содержанием азота также имеет определенные сложности, что связано с трудностью контроля его содержания и обеспечения высокой усвояемости азота расплавом. Эти затруднения могут быть успешно преодолены при получении быстрорежущих сталей с помощью плазменной наплавки в среде азота порошковыми проволоками [1-4].

Быстрорежущие стали обладают высокими служебными свойствами, но имеют неудовлетворительную свариваемость из-за высокой вероятности образования холодных трещин. В разработанных Сибирским государственным индустриальным университетом способах наплавки быстрорежущими сталями, претерпевающими фазовые превращения, для предотвращения образования холодных трещин предложено использовать эффект повышенной пла-

стичности («сверхпластичности») и регулируемый термический цикл с низкотемпературным подогревом. При применении этих способов наплавки можно получать наплавленный металл в закаленном состоянии, без трещин, что позволяет ограничиться для повышения твердости наплавленного металла высокотемпературным отпуском [4-7].

Для реализации предложенных способов применена плазменная наплавка порошковыми проволоками, обеспечивающими получение наплавленных быстрорежущих сталей, дополнительно легированных азотом. Плазменная наплавка в среде азота по сравнению с наплавкой в аргоне позволяет не только снизить затраты на наплавку, но и эффективно легировать наплавленный металл азотом из газовой фазы непосредственно в процессе наплавки, что существенно повышает его твердость и износостойкость.

Наплавленные быстрорежущие стали, легированные азотом и алюминием, обладают повышенными твердостью и износостойкостью, что подтверждено результатами промышленных испытаний таких деталей [4-7] и результатами лабораторных исследований [8-15]. Так, в работах [8, 9] показано, что с помощью дополнительного легирования азотом наплавочного порошка ПР-10Р6М5 можно изменять микроструктуру, фазовый состав и трибологические характеристики плазменных покрытий. Значительное повышение сопротивления быстрорежущего наплавленного металла абразивному изнашиванию авторы объясняют образованием карбонитридов взамен карбидов, образующихся при наплавке порошком ПР-10Р6М5 без легирования азотом. Легирование азотом приводит к повышению микротвердости и прочности карбидной фазы, что повышает эксплуатационную стойкость азотированных покрытий.

Высокие свойства быстрорежущих сталей достигаются специальным легированием и комплексной термической обработкой, которые обеспечивают определенный фазовый состав. Технологические характеристики быстрорежущих сталей напрямую определяются особенностями их микроструктуры. Несмотря на полученные положительные результаты испытаний, недостаточно изучены причины повышения твердости и износостойкости, их физическая сущность [4-7]. Поэтому исследования фазового состава и тонкой структуры наплавленного сплава являются важными задачами.

Цель настоящей работы – оптимизация режима высокотемпературного отпуска наплавленной в азоте экономнолегированной стали Р2М9ЮАТ, а также определение влияния отпуска на её структуру и микротвердость.

#### Материалы и методы исследования

Исследовали наплавленную быстрорежущую сталь Р2М9ЮАТ, дополнительно легированную алюминием и азотом, следующего химического состава, мас. %: С – 0,89; Cr – 3,47; W – 1,86; Mo – 7,98; V – 0,87; Ti – 0,64; Al – 1,54; N – 0,10. В качестве ос-

новного металла использовали низколегированную хромокремнемарганцевую сталь 30ХГСА (с хорошей свариваемостью) следующего химического состава, мас. %: С – 0,3; Cr – 0,9; Mn – 0,8; Si – 0,9.

Повышенное содержание азота в наплавленном металле обеспечивалось применением специально разработанной порошковой проволоки, содержащей углерод, хром, молибден, вольфрам, ванадий, алюминий, железо, никель, пыль электрофильтров алюминиевого производства, азотированный феррохром и титан [7]. Дополнительный вклад в повышение содержания азота в покрытии обеспечивало применение азота в качестве защитной атмосферы при плазменной наплавке.

Наплавку образцов осуществляли на модернизированной установке для плазменной наплавки порошковыми проволоками УД-417Д [4-7]. Образцы наплавливали плазменной дугой на обратной полярности с подачей в сварочную ванну нетоковедущей присадочной порошковой проволоки ПП-Р2М9ЮАТ. Использование сжатой дуги обратной полярности позволяет устранить трудоемкие, усложняющие технологические процессы наплавки операции по предварительной очистке поверхности изделия. В этом случае очистка наплаваемой поверхности от загрязнений происходит непосредственно в процессе наплавки за счет эффекта катодного распыления. Кроме того, при наплавке на обратной полярности достигается и меньшее разбавление наплавленного металла основным металлом. Для исключения образования пористости при плазменной наплавке в среде азота в состав наполнителя наплавочной порошковой проволоки введён алюминий в количестве 1,54 мас. %, связывающий избыточный азот в нерастворимые в расплаве соединения нитрида алюминия.

Режим наплавки следующий: сварочный ток  $I = 145-150$  А, рабочее напряжение на дуге  $U = 45-50$  В, скорость наплавки  $v_n = 18$  м/ч, скорость подачи порошковой проволоки  $v_{под} = 60$  м/ч, длина открытой дуги  $l_d = 20$  мм, расход защитного газа (азота)  $Q_{защ} = 20-22$  л/мин, расход плазмообразующего газа аргона  $Q_{плазм} = 6-8$  л/мин, диаметр проволоки 3,7 мм, коэффициент наплавки 18-20 г/(А·ч); коэффициент разбрызгивания не более 3,5%. После окончания наплавки образцы охлаждали на воздухе.

Из верхних слоев наплавленного металла вырезали образцы на станке электроискровой резки в среде керосина. Половину образцов от партии подвергали высокотемпературному отпуску по режиму: температура нагрева 560-580°C, время выдержки 1 ч, количество отпусков 4. Режим термообработки был выбран на основании ранее проведённых исследований [4-7]. Изучение полученных образцов проводили в двух состояниях: 1 – после наплавки; 2 – после наплавки и высокотемпературного отпуска. Образцы механически шлифовали на наждачной бумаге марки Р400 и алмазной пасте, а после этого электролитическим способом стравливали деформированный слой. Металлографические исследования проводили с помо-

щью светового микроскопа OLYMPUS GX-51 и сканирующего электронного микроскопа KYKY EM6900C [16-19]. Определение микротвёрдости поверхностных слоёв проводили с шагом 100 мкм по десяти отпечаткам с помощью прибора HVS-1000A методом Виккерса при нагрузке на индентор 10 Н. Измерения твердости проводили по методу Роквелла.

### Полученные результаты и их обсуждение

В покрытии, наплавленном на токе 145-150 А, формируется ячеистая первичная структура, характерная для структуры литых быстрорежущих сталей, кристаллизующихся в условиях равномерного охлаждения без преимущественного теплоотвода в каком-либо направлении (рис. 1). Очевидно, причиной отсутствия направленности теплоотвода является предварительный подогрев образцов при наплавке и подача холодной проволоки в сварочную ванну, что приводит к снижению градиента температур между подложкой и формируемым покрытием. Это приводит к снижению скорости кристаллизации и получению относительно крупнозернистой структуры ячеистой формы. Величина действительного зерна аустенита соответствует 6 баллу по ГОСТ 5639-82 (рис. 1, а).

В наплавленном металле металлическая основа дендритных кристаллов представлена мартенситно-аустенитной смесью, имеющей микротвёрдость 800-1100 HV. Первичные ячейки мартенситно-аустенитной смеси окружены сплошной развитой сеткой ледебуритной эвтектики различной морфологии – пластинчатой и скелетной (рис. 2). Наличие в покрытии одновременно двух типов ледебуритной эвтектики говорит об одновременном зарождении зародышей обеих эвтектик и частичном модифицировании карбидной фазы эвтектики за счёт легирования азотом. Микротвёрдость эвтектики скелетной формы составляет 1000-1200 HV, а микротвёрдость пластинчатой эвтектики составляет 1050-1300 HV. Более полная инверсия структуры эвтектики с заменой карбидов скелетной формы на карбиды пластинчатой формы возможна при повышении в составе покрытия содержания азота или при проведении термической обработки, в результате которой станет возможным растворение термодинамически менее равновесных карбидов цементитного типа с перераспределением легирующих элементов между металлической основой и оставшейся частью эвтектики.

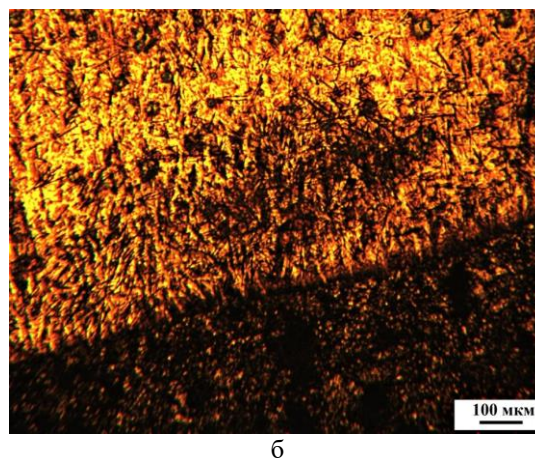
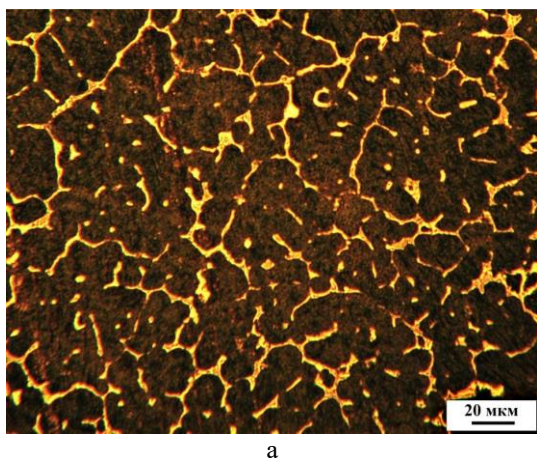


Рис. 1. Микроструктура покрытия после наплавки: а – средняя часть покрытия,  $\times 400$ ; б – зона сплавления,  $\times 100$   
Fig. 1. The coating microstructure after surfacing: а is a middle part of the coating,  $\times 400$ ; б is a fusion zone,  $\times 100$

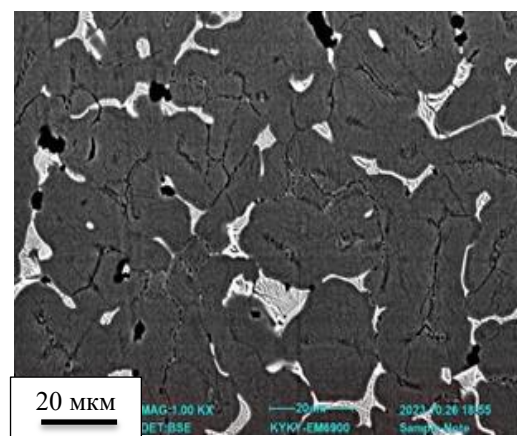
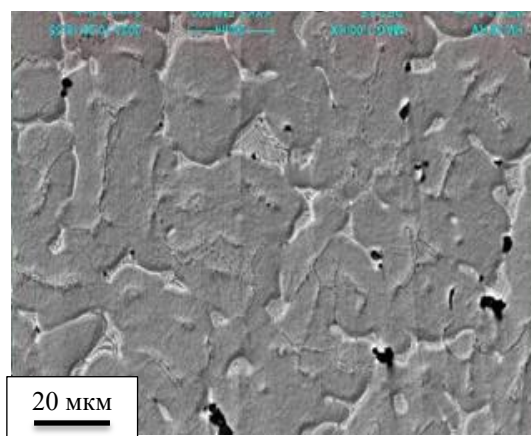


Рис. 2. Морфология эвтектики наплавленного покрытия  
Fig. 2. Morphology of eutectic of the surfaced coating

Распределение твёрдости Виккерса в поперечном сечении покрытия (рис. 3) имеет некоторую неравномерность. Это связано с тем, что различные отпечатки попадали в средние или периферийные участки валика наплавленного металла, которые имели различные термические истории, что подтверждается синусоидальным характером распределения твёрдости.

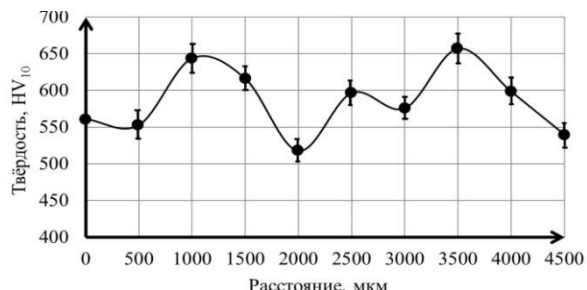
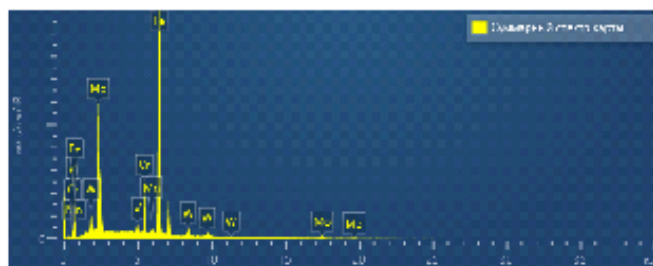
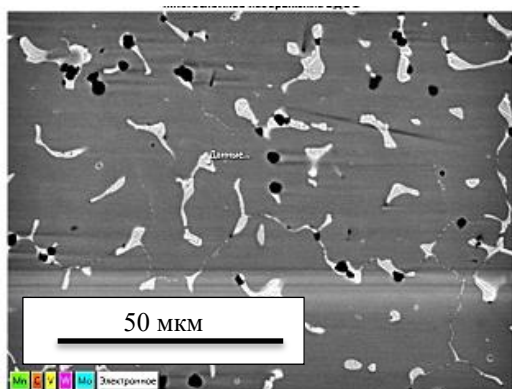


Рис. 3. Распределение твердости Виккерса в поперечном направлении покрытия  
Fig. 3. Vickers hardness distribution in the transverse direction of the coating

Проведение отпуска по описанному выше режиму приводит к существенным изменениям в структуре наплавленных покрытий. Ледебуритная эвтектика претерпевает частичное растворение, в результате



а

б

Рис. 4. Электронно-микроскопическое изображение структуры наплавки (а), энергетические спектры (б)  
Fig. 4. Electron microscope image of the surfacing structure (a), energy spectra (б)

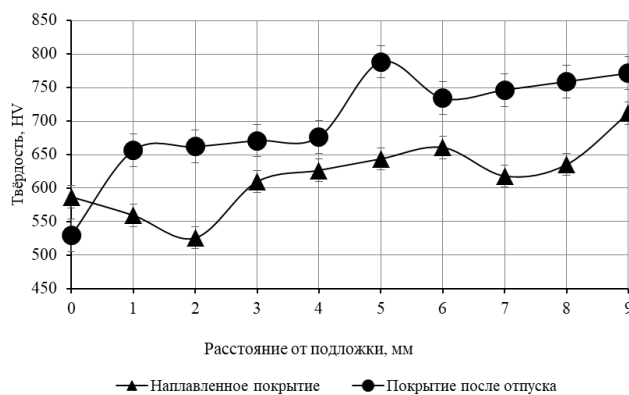
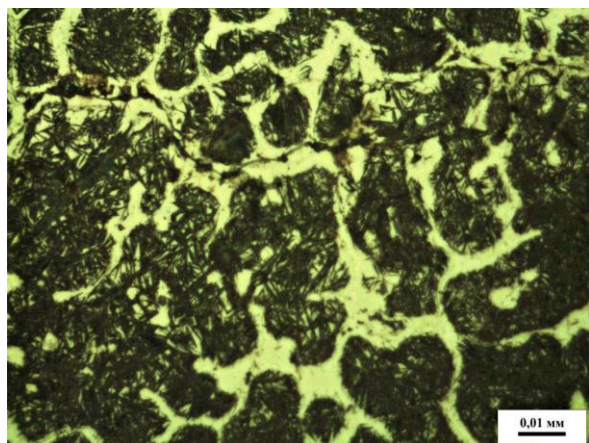
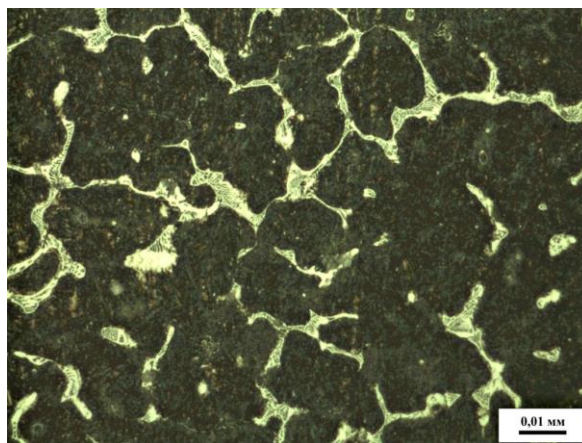


Рис. 5. Влияние отпуска на твёрдость покрытия: а – после наплавки; б – после отпуска  
Fig. 5. Effect of tempering on coating hardness: а is after surfacing; б is after tempering



а



б

Рис. 6. Структура металлической основы покрытия: а – наплавленное покрытие; б – покрытие после отпуска  
 Fig. 6. The structure of the metal base of the coating: а is a surfaced coating; б is a coating after tempering

При отпуске азот выделяется из металлической основы и образует нерастворимые мелкодисперсные нитриды и карбонитриды, прежде всего, вольфрама и ванадия. Комплексное легирование наплавленного металла азотом при плазменной наплавке из проволоки в защитно-легирующей атмосфере азота позволяет повысить твёрдость, износостойкость и теплостойкость покрытий.

Наличие в составе наплавленного металла сильного стабилизатора аустенита – азота – повышает количество остаточного аустенита, по сравнению с безазотистым покрытием, и уменьшает объёмный эффект мартенситного превращения, что, в свою очередь, снижает вероятность образования холодных трещин. Таким образом, азот оказывает благоприятное влияние при плазменной наплавке, снижая склонность наплавленного покрытия к трещинообразованию.

### Заключение

Таким образом, впервые изучена структура и свойства быстрорежущей стали Р2М9ЮАТ после наплавки и отпуска.

1. Уточнен режим высокотемпературного отпуска быстрорежущего сплава Р2М9ЮАТ. Режим высокотемпературного отпуска: температура нагрева 560-580°C, время выдержки 1 ч, количество отпусков 4.

2. Установлено, что распределение микротвёрдости наплавленного слоя в состоянии после плазменной наплавки характеризуется значительной неравномерностью. Микротвёрдость изменяется от минимального значения 4,68 до 5,93 ГПа. Четырёхкратный высокотемпературный отпуск при температурах 560-580°C приводит к превращению остаточного аустенита в мартенсит и выделению дополнительного количества карбидов и карбонитридов. Микротвёрдость наплавленного металла после отпуска возросла до 7,48 ГПа, а ее распределение стало более однородным.

3. Показано, что многослойная плазменная наплавка в защитно-легирующей среде азота быстрорежущей стали Р2М9ЮАТ позволяет получать качественный наплавленный слой в закаленном состоянии без трещин, пор и дефектов макро- и микроструктуры благодаря благоприятному влиянию азота на структурообразование.

4. Установлено, что структура наплавленного сплава представляет собой мартенсит отпуска, по границам зерен располагаются карбиды и карбонитриды на основе железа, вольфрама, хрома, молибдена, алюминия ( $Me_6NC$  и  $AlN$ ).

### Список источников

1. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. М.: Металлургия, 1983. 527 с.
2. Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г. Специальные стали. М.: МИСиС, 1999. 408 с.
3. Патон Б.Е. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением. М.: Металлургия, 1974. 768 с.
4. Малущин Н.Н., Валуев Д.В. Обеспечение качества деталей металлургического оборудования на всех этапах их жизненного цикла путем применения плазменной наплавки теплостойкими сталями. Томск: Изд-во НТЛ, 2013. 358 с.
5. Упрочнение теплостойких сплавов плазмой в среде азота: монография / Н.Н. Малущин, В.Е. Громов, Д.А. Романов, Л.П. Башенко, О.А. Перегудов. Новокузнецк: ООО «Полиграфист», 2022. 232 с.
6. Плазменная наплавка в азоте быстрорежущими сталями: учеб. пособие / Н.Н. Малущин, В.Е. Громов, Л.П. Башенко, О.А. Перегудов, С.В. Райков, Р.Е. Крюков. Новокузнецк: ООО «Полиграфист», 2023. 237 с.
7. Технология упрочнения деталей металлургического оборудования быстрорежущими сплавами с азотом / Малущин Н.Н., Громов В.Е., Романов Д.А., Башенко Л.П., Гостевская А.Н. // Заготови-

- тельные производства в машиностроении. 2023. Т. 21. №10. С. 441-447.
8. Емелюшин А.Н., Петроченко Е.В., Нефедьев С.П. Сравнение структуры и свойств литых и наплавленных износостойких материалов // Литейные процессы. 2012. №11. С. 141-145.
  9. Нефедьев С.П., Емелюшин А.Н. Влияние азота на формирование структуры и свойств плазменных покрытий типа 10P6M5 // Вестник Югорского государственного университета. 2021. № 3(62). С. 33-45.
  10. Фетисов Г.П. и др. Материаловедение и технология материалов. В 2 ч. Ч. 1. М.: Изд-во Юрайт, 2023. 406 с.
  11. Дедюх Р.И. Материаловедение и технологии конструкционных материалов. Технология сварки плавлением. М.: Изд-во Юрайт, 2023. 169 с.
  12. Инженерия поверхностей конструкционных материалов с использованием плазменных и пучковых технологий / А.В. Белый, А.С. Калинин, О.Г. Девойно, В.А. Кукареко. Минск: Беларуская навука, 2017. 459 с.
  13. Рябцев И.А., Сенченков И.К. Теория и практика наплавочных работ. Киев: ЕкоТехнологія, 2013. 400 с.
  14. Исследования и разработки ИЭС им. Е.О. Патона в области электродуговой сварки и наплавки порошковой проволокой (Обзор) / Походня И.К., Шлепаков В.Н., Максимов С.Ю., Рябцев И.А. // Автоматическая сварка. 2010. №12 (692). С. 34-42.
  15. Соснин Н.А., Ермаков С.А., Тополянский П.А. Плазменные технологии. Сварка, нанесение покрытий, упрочнение. М.: Машиностроение, 2008. 406 с.
  16. Ladd M., Palmer R. Structure Determination by X-ray Crystallography. New York: Kluwer Academic, Plenum Publishers, 2003. 819 p.
  17. Waseda Y., Matsubara E., Shinoda K. Diffraction Crystallography. Introduction, Examples and Solved Problems. Berlin: Springer, 2011. 310 p.
  18. Ernst F., Ruhle M., Science C. High-Resolution Imaging and Spectrometry of Materials. Berlin: Springer, 2003. 440 p.
  19. Weirich T. Electron Crystallography. Berlin: Springer, 2006. 536 p.
  20. ing the quality of metallurgical equipment parts at all stages of their life cycle using plasma surfacing with heat-resistant steels]. Tomsk: Scientific and Technical Literature (NTL) Publishing House, 2013, 358 p. (In Russ.)
  5. Malushin N.N., Gromov V.E., Romanov D.A., Bashchenko L.P., Peregudov O.A. *Uprochnenie teplostoykikh splavov plazmoy v srede azota: monografiya* [Strengthening of heat-resistant alloys by plasma in nitrogen environment: monograph]. Novokuznetsk: LLC Polygrafist, 2022, 232 p. (In Russ.)
  6. Malushin N.N., Gromov V.E., Bashchenko L.P., Peregudov O.A., Raikov S.V., Kryukov R.E. *Plazmennaya naplavka v azote bystrorezhushchimi stalyami: ucheb. posobie* [Plasma surfacing in nitrogen with high-speed steels: study guide]. Novokuznetsk: LLC Polygrafist, 2023, 237 p. (In Russ.)
  7. Malushin N.N., Gromov V.E., Romanov D.A., Bashchenko L.P., Gostevskaya A.N. Technology of strengthening parts of metallurgical equipment with high-speed alloys with nitrogen. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroyenii* [Blanking Production in Mechanical Engineering]. 2023;21(10):441-447. (In Russ.)
  8. Emelyushin A.N., Petrochenko E.V., Nefedev S.P. Comparison of the structure and properties of cast and surfaced wear-resistant materials. *Liteynye protsessy* [Foundry Processes]. 2012;(11):141-145. (In Russ.)
  9. Nefedev S.P., Emelyushin A.N. The influence of nitrogen on the formation of the structure and properties of plasma coatings of type 10R6M5. *Vestnik Yugorskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Yugra State University]. 2021;(3(62)):33-45. (In Russ.)
  10. Fetisov G.P. et al. *Materialovedenie i tekhnologiya materialov* [Materials science and technology of materials]. In 2 parts. Part 1. Moscow: Yurayt Publishing House, 2023, 406 p. (In Russ.)
  11. Dedyukh R.I. *Materialovedenie i tekhnologii konstruktivnykh materialov. Tekhnologiya svarki plavleniem* [Materials science and technology of structural materials. Fusion welding technology]. Moscow: Yurayt Publishing House, 2023, 169 p. (In Russ.)
  12. Bely A.V., Kalinichenko A.S., Devoino O.G., Kukareko V.A. *Inzheneriya poverkhnostey konstruktivnykh materialov s ispolzovaniem plazmennyykh i puchkovyykh tekhnologiy* [Engineering of surfaces of structural materials using plasma and beam technologies]. Minsk: Belaruskaya navuka, 2017, 459 p. (In Russ.)
  13. Ryabtsev I.A., Senchenkov I.K. *Teoriya i praktika naplavochnykh работ* [Theory and practice of surfacing operations]. Kyiv: Ecotekhnologiya, 2013, 400 p. (In Russ.)
  14. Pokhodnya I.K., Shlepakov V.N., Maksimov S.Yu., Ryabtsev I.A. Research and development of the Paton Institute of Electric Welding in the field of electric arc welding and surfacing with flux-cored wire: Review. *Avtomaticheskaya svarka* [Automatic Welding]. 2010;(12(692)):34-42. (In Russ.)

### References

1. Geller Yu.A. *Instrumentalnye stali* [Tool steels]. Moscow: Metallurgiya, 1983, 527 p. (In Russ.)
2. Goldshtein M.I., Grachev S.V., Veksler Yu.G. *Spetsialnye stali* [Special steels]. Moscow: MISIS, 1999, 408 p. (In Russ.)
3. Paton V.E. *Tekhnologiya elektricheskoy svarki metallov i splavov plavleniem* [Technology of electric welding of metals and alloys by fusion]. Moscow: Metallurgiya, 1974, 768 p. (In Russ.)
4. Malushin N.N., Valuev D.V. *Obespechenie kachestva detaley metallurgicheskogo oborudovaniya na vseh etapakh ikh zhiznennogo tsikla putem primeneniya plazmennoy naplavki teplostoykimi stalyami* [Ensuring

15. Sosnin N.A., Ermakov S.A., Topolyansky P.A. *Plazmennye tekhnologii. Svarka, naneseenie pokrytiy, uprochnenie* [Plasma technologies. Welding, coating, hardening]. Moscow: Mashinostroenie, 2008, 406 p. (In Russ.)
16. Ladd M., Palmer R. Structure determination by X-ray crystallography. New York: Kluwer Academic, Plenum Publishers, 2003, 819 p.
17. Waseda Y., Matsubara E., Shinoda K. Diffraction crystallography. Introduction, examples and solved problems. Berlin: Springer, 2011, 310 p.
18. Ernst F., Ruhle M. High-resolution imaging and spectrometry of materials. Berlin: Springer, 2003, 440 p.
19. Weirich T. Electron crystallography. Berlin: Springer, 2006, 536 p.

Поступила 01.04.2024; принята к публикации 23.04.2024; опубликована 30.09.2024  
Submitted 01/04/2024; revised 23/04/2024; published 30/09/2024

**Емелюшин Алексей Николаевич** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры литейного производства и материаловедения, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: emelushin@magtu.ru. ORCID 0000-0002-2893-1153

**Миненко Сергей Сергеевич** – соискатель кафедры естественнонаучных дисциплин имени профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный университет, Новокузнецк, Россия.  
Email: mss121278@mail.ru. ORCID 0009-0003-6592-2276

**Громов Виктор Евгеньевич** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин имени В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.  
Email: gromov@physics.sibsiu.ru. ORCID 0000-0002-5147-5343

**Чапайкин Александр Сергеевич** – аспирант, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.  
Email: thapajkin.as@yandex.ru. ORCID 0009-0009-8160-7827

**Alexey N. Emelyushin** – DrSc (Eng.), Professor, Professor of the Department of Foundry and Materials Science, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: emelushin@magtu.ru. ORCID 0000-0002-2893-1153

**Sergey S. Minenko** – degree-seeking applicant of the Finkel Department of Natural Sciences, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.  
Email: mss121278@mail.ru. ORCID 0009-0003-6592-2276

**Viktor E. Gromov** – Doctor (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Finkel Department of Natural Sciences, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.  
Email: gromov@physics.sibsiu.ru. ORCID 0000-0002-5147-5343

**Alexander S. Chapaikin** – postgraduate student, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.  
Email: thapajkin.as@yandex.ru. ORCID 0009-0009-8160-7827



# УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ. СТАНДАРТИЗАЦИЯ. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА PRODUCT QUALITY MANAGEMENT. STANDARDIZATION. INDUSTRIAL MANAGEMENT

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)  
УДК 658.511.3  
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-3-121-130



## МАТЕРИАЛЬНОЕ СТИМУЛИРОВАНИЕ ИНЖЕНЕРОВ-КОНСТРУКТОРОВ АВИАСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ КАК ИНСТРУМЕНТ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РИТМИЧНОСТИ ПРОЕКТНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Васин С.А.<sup>1</sup>, Фетисов М.Н.<sup>2</sup>, Трушин Н.Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Тульский государственный университет, Тула, Россия

<sup>2</sup> АО «НЦВ Миль и Камов», Томилино, Московская область, Россия

**Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы).** В Российской Федерации действует «Комплексная программа развития авиатранспортной отрасли до 2030 г.», которая предусматривает интенсивное производство самолётов и вертолётов. Для осуществления поставленных задач предприятиям авиационной промышленности необходимы техническое перевооружение, внедрение новых технологий, методов проектирования и планирования производства пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов. Одной из основных задач организации проектно-конструкторских работ – материальное стимулирование интеллектуального труда. **Цель работы.** Разработать методику материального поощрения исполнителей проектно-конструкторских работ исходя из результативности работы инженерного персонала предприятия. **Используемые методы.** Прямой перенос существующих методик материального стимулирования рабочего персонала на инженеров-конструкторов не является рациональным решением, поскольку специфика инженерного труда кардинально отличается от содержания труда рабочих. Премирование в конструкторских бюро не увязано с результатом работы их коллективов, сложностью, напряженностью и стратегической значимостью решаемых задач, и поэтому не является действенным стимулом для конкретных коллективов и конструкторов. **Новизна.** На основе анализа известных методов материального стимулирования конструкторского труда в АО «НЦВ Миль и Камов» разработана методика распределения премии среди работников конструкторских подразделений. Методика распределения премии разработана таким образом, что не определяет размер премии для структурного подразделения, а только распределяет фонд стимулирования предприятия в рамках установленного процента бюджетным комитетом по отделам в структурном подразделении. **Результат.** Методика распределения премии среди исполнителей проектов предприятия оформлена как локальный нормативный акт АО «НЦВ Миль и Камов» и введена в действие в 2023 г. **Практическая значимость.** Результаты анализа деятельности инженеров-конструкторов легли в основу специального инструментария обеспечения качества проектно-конструкторских работ. Практическое применение разработок показало их работоспособность как инструмента повышения ритмичности работы подразделений предприятия по выполнению производственных заказов.

**Ключевые слова:** авиационная промышленность, подготовка производства, организация и планирование проектно-конструкторских работ, материальное стимулирование

© Васин С.А., Трушин Н.Н., Фетисов М.Н., 2024

### Для цитирования

Васин С.А., Трушин Н.Н., Фетисов М.Н. Материальное стимулирование инженеров-конструкторов авиационного предприятия как инструмент обеспечения ритмичности проектной деятельности // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №3. С. 121-130. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-121-130>



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

# FINANCIAL INCENTIVES FOR DESIGN ENGINEERS OF AN AIRCRAFT MANUFACTURING COMPANY AS A TOOL FOR ENSURING THE DESIGN ACTIVITY RHYTHMICITY

Vasin S.A.<sup>1</sup>, Fetisov M.N.<sup>2</sup>, Trushin N.N.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Tula State University, Tula, Russia

<sup>2</sup> JSC National Helicopter Center Mil and Kamov, Tomilino, Moscow Region, Russia

**Abstract. Problem Statement (Relevance).** The Russian Federation implements “The 2030 Comprehensive Program on Developing the Air Transport Industry”, providing for intensive production of planes and helicopters. To achieve the set objectives, aviation industry enterprises need technical revamping, introduction of new technologies, methods of designing and planning production of manned and unmanned aerial vehicles. One of the main objectives of organizing design and construction work is financial incentives of intellectual labor. **Objectives.** The research is aimed at developing a methodology of material incentives for design and construction engineers based on performance of engineering personnel of the company. **Methods Applied.** It is not a rational solution to directly transfer the existing methods of financial incentives for workers to design engineers as special nature of engineering work drastically differs from the job of workers. Bonuses in design bureaus are not linked to the result of work of their teams, complexity, intensity and strategic importance of the tasks solved, and therefore they are not an efficient incentive for specific teams and designers. **Originality.** Having analyzed known methods of financial incentives for design engineers at JSC Mil and Kamov, the authors developed the methodology of a bonus distribution among employees of design departments. The bonus distribution methodology is developed so that it does not determine the bonus size for a corporate division, but only distributes the fund of incentives at the plant among departments in the corporate division according to the percent set by the budget committee. **Result.** The methodology of the bonus distribution among engineers fulfilling the company’s projects was formalized as a local regulatory document of JSC Mil and Kamov and put into effect in 2023. **Practical Relevance.** The results of the analysis of design engineers’ activities formed the basis of a special toolkit for quality assurance of design and engineering. A practical application of the development has shown its efficiency as a tool for increasing the rhythm of work of the corporate divisions in fulfilling production orders.

**Keywords:** aviation industry, production preparation, organization and planning of design and development activities, financial incentives

## For citation

Vasin S.A., Fetisov M.N., Trushin N.N. Financial Incentives For Design Engineers Of An Aircraft Manufacturing Company As A Tool For Ensuring The Design Activity Rhythmicity. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 3, pp. 121-130. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-121-130>

## Введение

Проблемы и задачи устойчивого развития промышленных предприятий рассматриваются во многих отечественных и зарубежных публикациях. Так, например, в монографии [1] рассматривается систематизация ключевых условий обеспечения устойчивого развития компании. В данной работе отмечается, что, во-первых, компания должна быть устойчивой в каждом из направлений своего развития: экономическом, социальном и экологическом. Во-вторых, развитие компании должно отвечать концепции устойчивого развития, основанной на сбалансированности экономического, социального и экологического путей развития. Соответственно, в структуре потребностей и ожидания общества от деятельности компании выделяются три вида ее ответственности перед обществом: экономическая, социальная и экологическая. В свою очередь, в части социальной ответственности компании перед обществом существует такой эле-

мент этой ответственности, как «Уровень заработной платы».

В монографии [1] с системных позиций рассматриваются внутренние и внешние механизмы-регуляторы обеспечения устойчивого развития компании, которые могут оказывать прямое или косвенное действие на процессы компании. Мотивация сотрудников компании, которая содержит смешанные формы материального и нематериального вознаграждения за труд, в соответствии с представленными в монографии моделями относится к внутренним инструментам-регуляторам косвенного действия.

Материальное стимулирование работников компании является доминирующим методом среди всех возможных методов вознаграждения работников за результаты своего труда. Проблематика материального стимулирования работников промышленных предприятий также многократно рассмотрена в научных работах, методических и учебных пособиях отечественных

и зарубежных ученых и практиков. В этой связи отметим монографию [2], в которой не только освещаются фундаментальные проблемы и задачи материального стимулирования труда, но и приводятся обширные списки публикаций (по состоянию на 2007 г.) по отдельным направлениям данной проблематики. Очевидно, что со времени издания данной монографии количество публикаций по методам и методикам материального стимулирования работников промышленных предприятий еще более увеличилось.

Современные летательные аппараты и другая авиационная техника в полной мере может быть отнесены к мехатронным системам, поскольку они глубоко насыщены средствами авионики и другими сложными системами (механическими, электрическими, гидравлическими). Национальный центр вертолетостроения «Миль и Камов», который является ведущим российским предприятием-разработчиком вертолетов, в полной мере является наукоемким предприятием, в котором работают высококвалифицированные инженеры-конструкторы и инженеры-исследователи, создающие передовые образцы вертолетов различного назначения. Наличие многочисленного коллектива работников интеллектуального труда – конструкторов, технологов, расчетчиков, исследователей, испытателей – накладывает свои особенности на решение задач справедливого материального обеспечения и стимулирования. Прямой перенос методик материального стимулирования рабочего персонала не является рациональным решением, поскольку специфика инженерного труда кардинально отличается от содержания труда рабочих.

Совершенствование методик материального стимулирования проектно-конструкторских работ и инженеров-конструкторов рассмотрены, например, в [5-9]. Так, в работе [7] предлагается система оценок качества, на основе которых формируется премиальное обеспечение инженерно-технических работников промышленного предприятия. В работе [8] рассматривается методика проектирования оптимально-согласованной системы материального стимулирования работников конструкторских отделов в условиях выполнения сторонних заказов. В работе [9] освещаются основные положения разработанной нами системы стимулирования конструкторов к созданию новой техники, апробированной и внедренной в Управлении Генерального конструктора ОАО «Амкорд» (Республика Беларусь).

Белорусские специалисты отмечают, что применяемые на машиностроительных предприятиях и рекомендуемые в научной и нормативной литературе подходы к стимулированию труда традиционно сводятся к установлению различных надбавок к окладам конкретных сотрудников и премированию за достижение плановых показателей по отдельным категориям работников предприятия. Применительно к конструкторской подготовке производства новой техники целью стимулирования является достижение един-

ства интересов всех категорий сотрудников конструкторской службы предприятия в повышении качества конструкторских работ и ускорении процесса создания конкурентоспособной новой техники на основе учета и поощрения трудового вклада каждого подразделения и отдельных работников. Разработка новой техники ведется конструкторской службой в соответствии с планом НИОКР (планом разработки новой техники) предприятия на текущий год и сетевым графиком выполнения работ основными конструкторскими бюро (КБ), базирующимися на утвержденных предприятием нормативах времени конструкторской подготовки производства (КПП).

По мнению белорусских ученых и практиков, результативность деятельности конструкторской службы при разработке новой техники наиболее полно и объективно характеризуется двумя показателями:

1) соблюдение конструкторской службой и ее структурными подразделениями плановых сроков выполнения этапов и комплексов конструкторских работ, заложенных в сводном сетевом календарном графике по конкретным моделям новой техники;

2) обеспечение качественной разработки конструкторской документации (КД). Оценка качества разработанной КД дается ответственным за машину конструктором либо руководителем конструкторской службы, а по машине в целом – Научно-техническим советом (НТС) предприятия (либо уполномоченным на то органом предприятия).

Авторы работы [9] отмечают также, что на крупных белорусских машиностроительных заводах премирование конструкторов за создание новой техники осуществляется при условии выполнения именно этих показателей. Однако следует отметить, что применяемые методики (положения) сводятся к установлению на базе показателей премирования только общей величины премиального фонда за создание новой техники для конструкторской службы в целом, суммы премирования КБ определяются руководителем службы (Генеральным конструктором) без прямой методической привязки к конкретным показателям работы подразделений. То есть премирование основных КБ не увязано с результатом работы их коллективов, сложностью, напряженностью и стратегической значимостью решаемых задач и поэтому не является действенным стимулом для конкретных коллективов и конструкторов.

Анализ публикаций показал, что за последнее время в России было проведено значительное количество исследований, охвативших стимулирование инженерно-технических работников (ИТР). Кроме этого, среди большого методического материала, оставшегося с позднего советского времени, значительная часть долгое время не использовалась, но с учетом экстраполяции на современные условия может быть также применена, поскольку сконцентрирована на строгой зависимости вознаграждения от результатов работы сотрудника и соответствует запросам рыночной экономики.

Инженерный труд, как и любой творческий труд, при нормировании, планировании и организации очень сложно поддается измерению, как это еще раз отмечено в работе [5], что необходимо для расчета переменной части оплаты труда, к которым относятся материальные стимулы. Таким образом, необходимы исследования, позволяющие дать необходимую количественную оценку материальному вознаграждению.

### Материалы и методы исследования

Особое место в методологии материального стимулирования отводится методам и способам поощрения работников машиностроительных предприятий. Это обусловлено тем объективным обстоятельством, что машиностроительное производство является основой социально-экономического развития государства [3]. Экономическую мощь страны в первую очередь обуславливают именно предприятия тяжелой промышленности и предприятия с наукоемким характером производства. В наукоемких производствах доля интеллектуального труда инженеров и исследователей в конечной продукции доходит до 40-60% [4]. К наукоемким предприятиям относятся, в частности, предприятия авиационной промышленности и автомобилестроения, электронной и электротехнической промышленности, кораблестроительные предприятия, предприятия военно-промышленного комплекса и мн. др. При этом доля наукоемких производств в мире резко увеличилась за последние 50 лет во многом благодаря взрывному развитию электротехники и электроники, а на их основе разнообразных мехатронных систем.

### Полученные результаты и их обсуждение

На основе изучения накопленного опыта в АО «НЦВ Миль и Камов» разработана методика, которая устанавливает порядок распределения премии для подразделений объединенного опытно-конструкторского бюро (ООКБ) по итогам выполнения производственного плана предприятия за месяц. Методика оформлена как локальный нормативный акт (ЛНА). Методика содержит расчеты, направленные на объективное распределение установленной ежемесячной премии между подразделениями ООКБ по результатам выполнения производственного плана. Методика предназначена для руководителей ООКБ, сотрудников КБ, а также иных сотрудников, назначенных ответственными за контроль расчета распределения премии.

Разработанная в АО «НЦВ Миль и Камов» методика использует следующие специальные термины:

- *детализированная сдаточная позиция* – конкретная работа (задача), выполняемая подразделением со сроком завершения в отчетном месяце, а также с прошедшим сроком, но подлежащая к выполнению;
- *фактическая загрузка* – отношение объема работы, измеренного в единицах времени (часах) к фонду рабочего времени (выраженное в процентах);
- *нормо-час* – показатель, характеризующий количество времени, используемого на предприятии для выполнения той или иной производственной задачи;

– *человеко-час* – единица измерения рабочего времени, соответствующая часу фактической работы одного человека;

– *работы с признаком «П»* – приоритетные работы, которые необходимо выполнить в первую очередь, определенные в соответствии с ЛНА «Методика определения приоритета проекта»;

– *отчет о выполнении производственного плана предприятия* – отчетная форма установленного вида, содержащая информацию о номенклатуре, планируемых и фактических трудозатратах, сроках по основной тематике и мощности по основному производственному персоналу;

– *показатель исполнения производственного плана* – данные, на основании которых можно судить об исполнении производственного плана предприятия;

– *коэффициент качества* – параметр, рассчитываемый ежемесячно подразделением методологии качества проектирования.

Разработанная методика своей целью имеет мотивацию руководителей КБ в части выполнения производственного плана подразделения, заблаговременного планирования задач в подразделении, определения сроков и объемов выполняемых работ и создания условий своевременного выполнения работ по проектам. Распределение премии производится на основе данных отчета по итогам выполнения показателей исполнения производственного плана предприятия по детализированным сдаточным позициям и фактической загрузке подразделений плановыми работами (с признаком «П») в нормо-часах, сформированного плано-диспетчерским управлением предприятия.

При распределении премии по детализированным сдаточным позициям принимается количество выполненных работ в штуках (единицах), по фактической загрузке плановыми работами (с признаком «П») – мощность в человеко-часах (ч/ч) и трудоемкость в нормо-часах (н/ч). До начала распределения премии, установленной бюджетным комитетом на текущий месяц, размер премии делится на две равные части. Расчет производится отдельно по каждой части: по выполнению детализированных сдаточных позиций и по фактической загрузке плановыми работами (с признаком «П»). По окончании расчета обе части суммируются. Расчет премии производится отдельно по каждому подразделению ООКБ. При расчете премии по итогам выполнения производственного плана учитывается коэффициент качества.

Расчет части премии по итогам выполнения детализированных сдаточных позиций производится на основе следующих показателей:

- плана по детализированным сдаточным позициям;
- выполнения плана детализированных сдаточных позиций с признаком «П»;
- невыполнения плана детализированных сдаточных позиций с признаком «П»;
- выполнения дополнительных детализированных сдаточных позиций.

Порядок расчета следующий.

Выполнение плана по детализированным сдаточным позициям с признаком «П» в процентах производится по формуле

$$ПП = \frac{СП_{\text{выпП}}}{СП_{\text{плП}}} \cdot 100, \quad (1)$$

где ПП – процент выполнения плана по детализированным сдаточным позициям с признаком «П»; СП<sub>выпП</sub> – количество выполненных по плану детализированных сдаточных позиций с признаком «П»; СП<sub>плП</sub> – количество запланированных детализированных сдаточных позиций с признаком «П».

Расчетная премия за выполнение детализированных сдаточных позиций с признаком «П» в процентах производится по формуле

$$РП = \frac{ПП \cdot K_{1,4} \cdot УП}{100} \cdot КК, \quad (2)$$

где РП – расчетная премия за выполнение детализированных сдаточных позиций с признаком «П»; K<sub>1,4</sub> – выравнивающий коэффициент, исходное значение которого равно 1,4; УП – 1/2 от установленного бюджетным комитетом процента премии в текущем месяце; КК – коэффициент качества планирования, расчет которого осуществляется по специальной методике, утвержденной ЛНА предприятия.

В случае если план по детализированным сдаточным позициям с признаком «П» не выполнен на 100%, то установленный процент премии будет распределен не полностью. Остаток распределяется по подразделениям, которые выполнили дополнительные детализированные сдаточные позиции с признаком «Доп».

Нераспределенный остаток премии распределяется за выполнение дополнительных детализированных сдаточных позиций «Доп» в соответствии с долей в процентах, выполненных подразделением дополнительных позиций в общем объеме выполненных дополнительных позиций «Доп» всеми подразделениями.

После распределения процента за выполнение детализированных сдаточных позиций с признаком «П» расчет остатка (не распределенного) процента премии производится по формуле

$$ОС = УП - РП, \quad (3)$$

где ОС – остаток процента премии после распределения процента за выполнение детализированных сдаточных позиций с признаком «П».

Расчет доли работ «Доп» в общем объеме «Доп» в процентном отношении рассчитывается по формуле

$$D_{\text{ДР}} = \frac{K_{0,5} \cdot СП_{\text{Доп}} \cdot ССЧ_{\text{ОокБ}}}{\sum СП_{\text{Доп}} \cdot ССЧ_{\text{КБ}}}, \quad (4)$$

где D<sub>ДР</sub> – доля работ «Доп» в общем объеме «Доп», %; СП<sub>Доп</sub> – выполненные дополнительные сдаточные позиции «Доп»; K<sub>0,5</sub> – выравнивающий коэффициент, исходное значение которого равно 0,5;  $\sum СП_{\text{Доп}}$  – сумма выполненных дополнительных сдаточных позиций «Доп» по ООКБ; ССЧ<sub>КБ</sub> – среднесписочная численность сотрудников КБ; ССЧ<sub>ОокБ</sub> – сумма среднесписочной численности ООКБ.

При распределении остатка процента премии методика учитывает тот факт, что количественный состав сотрудников в КБ различается. В этой связи при расчете распределения остатка используется коэффициент K<sub>1</sub>, который рассчитывается исходя из отношения количества сотрудников в подразделении каждого КБ к общей среднесписочной численности сотрудников ООКБ. Указанный коэффициент рассчитывается по формуле

$$K_1 = \frac{D_{\text{ДР}}}{\sum D_{\text{ДР}}} \cdot 100, \quad (5)$$

где K<sub>1</sub> – коэффициент для распределения остатка по сдаточным позициям;  $\sum D_{\text{ДР}}$  – суммарная доля дополнительных работ «Доп» в общем объеме «Доп» по всему ООКБ, %.

Расчетная премия, то есть распределение остатка денежных средств, за выполнение дополнительных детализированных сдаточных позиций «Доп» в процентах производится по формуле

$$РО = \frac{K_1 \cdot ОС}{100}. \quad (6)$$

Итоговая доля расчетной премии в процентах за выполнение детализированных сдаточных позиций рассчитывается по формуле

$$ПИ = РП + РО. \quad (7)$$

Расчет части премии по итогам выполнения нормо-часов производится на основе следующих показателей:

- плановой мощности оперативно-производственного персонала (ОПП);
- 70% от плановой мощности ОПП;
- выполнения плановых работ с признаком «П»;
- 70% выполнения плановых работ с признаком «П»;
- объема выполненных дополнительных работ.

Распределение части премии производится по результатам оценки распределения фактической загрузки

ки подразделения по плановым работам (с признаком «П») и дополнительным работам «Доп».

Целевым показателем на предприятии установлено следующее соотношение: 70% фактической мощности распределяется на работы с признаком «П», 30% фактической мощности – на дополнительные работы «Доп». Обоснование данного соотношения приводится в работе [10].

Дальнейшие расчеты производятся в следующем порядке. Расчетная премия за выполнение работ с признаком «П» в процентах производится по формуле

$$РП2 = \frac{ПР}{M_{Пл}} \cdot УП \cdot КК, \quad (8)$$

где РП2 – расчетная премия за выполнение работ с признаком «П» для КБ; ПР – выполнение плановых работ с признаком «П», н/ч;  $M_{Пл}$  – 70 % от плановой мощности ОПП, н/ч.

В случае если фактическая загрузка подразделений по работам с признаком «П» менее 70%, то установленный объем премии будет распределен не полностью. Остаток распределяется по подразделениям, которые выполнили дополнительные работы «Доп» в соответствии с долей дополнительных работ в общем объеме выполненных дополнительных работ.

После распределения части премиального фонда за выполнение плановых работ с признаком «П» расчет нераспределенной части премии производится по формуле

$$ОС2 = УП - РП2, \quad (9)$$

где ОС2 – остаток процента премии после распределения процента за выполнение плановых работ с признаком «П».

Расчет относительной доли (в процентах) дополнительных работ «Доп» в общем объеме «Доп» производится по формулам:

$$ПД2 = \begin{cases} \frac{ЗД_{п}}{0,3M_{п}}, & \text{если } ЗД_{п} \leq 0,3M_{п}, \\ \frac{ЗД_{п}}{0,3M_{п}} + \frac{ЗД_{п} - 0,3M_{п}}{2M_{п}}, & \text{если } ЗД_{п} > 0,3M_{п}, \end{cases} \quad (10)$$

где ПД2 – процент доли дополнительных работ «Доп» в общем объеме «Доп»;  $ЗД_{п}$  – загрузка дополнительными работами «Доп» подразделения, н/ч;  $M_{п}$  – мощность подразделения, ч/ч.

Расчет доли дополнительных работ (в процентах) производится с учетом коэффициента  $K_2$  для распределения остатка по нормо-часам, который рассчитывается исходя из отношения процента доли выполнения плановых и дополнительных работ каждым подразделением КБ по отношению к общей доле выполнения плановых и дополнительных работ всего ООКБ. Этот коэффициент рассчитывается по формуле

$$K_2 = \frac{ДР_{КБ}}{\sum ДР_{КБ}}, \quad (11)$$

где  $ДР_{КБ}$  – процент доли дополнительных работ «Доп» КБ в общем объеме «Доп»;  $\sum ДР_{КБ}$  – суммарный процент доли дополнительных работ «Доп» в общем объеме «Доп» по всему ООКБ.

Доля расчетной премии (в процентах) за выполнение дополнительных работ «Доп» (распределение остатка) производится по формуле

$$РО2 = K_2 \cdot \sum ОС2, \quad (12)$$

где РО2 – премия за выполнение дополнительных работ «Доп» в процентах (распределение остатка);  $K_2$  – коэффициент для распределения остатка по нормо-часам;  $\sum ОС2$  – общая (итоговая) сумма остатка процента премии по всем КБ после распределения процента за выполнение плановых работ с признаком «П».

Объем итоговой премии в процентах по нормо-часам рассчитывается по формуле

$$ПИ2 = РП2 + РО2, \quad (13)$$

где ПИ2 – итоговая премия по нормо-часам.

Общая премия рассчитывается путем сложения итоговых премий по сдаточным позициям и нормо-часам:

$$ПИ_{Общ} = ПИ + ПИ2. \quad (14)$$

По окончании расчета премии формируется сводная таблица, используемая далее руководством ООКБ для распределения размера премии в подразделениях предприятия.

Рассмотрим далее методику расчета коэффициентов КК и  $K_{1,4}$ .

Коэффициент качества планирования КК используется в расчете премиальной части фонда оплаты труда (ФОТ) проектно-конструкторских подразделений предприятия. Этот коэффициент предназначен для мотивации команд управления проектами в части заблаговременного планирования задач проекта, определения сроков и объемов выполняемых работ, для создания условий своевременного выполнения работ по проектам.

Расчет коэффициента КК за отчетный месяц производится по следующей методике. Коэффициент принимает значения от 0 до 1 и рассчитывается с точностью третьего знака после запятой для каждого определенного проектно-конструкторского подразделения за отчетный месяц. Для расчета коэффициента КК используется формула

$$KK = 0,4K_{\Pi} + 0,6K_{B}. \quad (15)$$

Величина  $K_{\Pi}$  вычисляется как математическое ожидание коэффициента качества планирования по всем выполняющимся проектам по формуле

$$K_{\Pi} = \frac{\sum_{i=1}^N K_{\Pi_i}}{N}, \quad (16)$$

где  $N$  – количество выполняющихся проектов;  $K_{\Pi_i}$  – оценка полноты планирования  $i$ -го выполняющегося проекта.

Величина  $K_{\Pi}$  связывает объемные параметры планирования и направлена на повышение качества управления содержанием проектов (полнота номенклатуры выполняемых задач с корректной оценкой их трудоемкости, заблаговременная корректировка планов).

Величина  $K_{B}$ , характеризующего ритмичность работы КБ, вычисляется по формуле

$$K_{B} = \begin{cases} 0, & \text{если } N_{\text{план}} = 0 \\ N_{\text{вып}}/N_{\text{план}} \end{cases}, \quad (17)$$

где  $N_{\text{вып}}$  – количество полностью выполненных сдаточных позиций с плановым окончанием в отчетном месяце;  $N_{\text{план}}$  – количество сдаточных позиций с плановым окончанием в отчетном месяце либо ранее.

Величина  $K_{B}$  отражает ритмичность работы и своевременность выполнения сдаточных позиций и связывает планирование работ руководителем проекта с возможностью их выполнения в установленный

срок, требуя при этом качественного обеспечения и сопровождения выполнения работ.

Величина  $K_{\Pi_i}$  рассчитывается для каждого выполняющегося  $i$ -го проекта по формуле

$$K_{\Pi_i} = K_{\Pi_{г_i}} \cdot K_{\Pi_{расп_i}} \cdot K_{\Pi_{об_i}}. \quad (18)$$

Параметры  $K_{\Pi_{г_i}}$ ,  $K_{\Pi_{расп_i}}$ ,  $K_{\Pi_{об_i}}$  принимают значения, приведенные в **табл. 1**.

$$K_{\Pi_{об_i}} = \begin{cases} 0, & \text{если } V_{\Pi_{н}} = 0 \text{ или } \frac{V_{\Pi_{по}}}{V_{\Pi_{н}}} > 0,2, \\ 1 - \frac{V_{\Pi_{по}}}{0,2V_{\Pi_{н}}}, & \text{если } \frac{V_{\Pi_{по}}}{V_{\Pi_{н}}} \leq 0,2, \\ 1, & \text{если } V_{\Pi_{по}} = V_{\Pi_{н}}, \end{cases} \quad (19)$$

где  $V_{\Pi_{по}}$  – плановый объем трудозатрат проекта по окончании месяца;  $V_{\Pi_{н}}$  – плановый объем трудозатрат на начало месяца.

По формуле (19) вычисляется относительное отклонение объема трудозатрат на начало квартала (в утвержденном квартальном плане) от объема на окончание отчетного периода, как в сторону уменьшения, так и увеличения. В случае отклонения более чем на 20%, коэффициент принимает значение 0. В противном случае коэффициент изменяется линейно в диапазоне от 0 до 1 при отклонениях в диапазоне 0-20%.

Коэффициенты  $K_{\Pi_{г_i}}$  и  $K_{\Pi_{расп_i}}$  используются для мотивации команды управления проектом в части заблаговременной проработки и подготовки минимально необходимого объема проектной документации для включения работ в планы предприятия.

Таблица 1. Определение параметров оценки полноты планирования выполняющихся проектов  
Table 1. Determination of parameters for assessing completeness of the planning of ongoing projects

Параметр	Смысл параметра	Минимальное значение	Максимальное значение	Расчетная формула
$K_{\Pi_{г_i}}$	Своевременность подготовки и согласования плана-графика проекта (этапа проекта) и регистрация его в информационную систему управления предприятием в статусе «Планируется»	0,9 – план-график не был подготовлен и утвержден до планового начала выполнения работ	1 – план график был подготовлен и утвержден до планового начала выполнения работ	Выбирается максимальное либо минимальное значение
$K_{\Pi_{расп_i}}$	Своевременность выпуска распоряжения на открытие заказа для выполнения работ по проекту (этапу проекта) и перевод плана-графика в статус «Выполняется» (включение работ в планы)	0,85 – распоряжение не было выпущено до 1 числа месяца планового начала работ (включительно)	1 – распоряжение было выпущено до 1 числа месяца (включительно) планового начала работ	Выбирается максимальное либо минимальное значение
$K_{\Pi_{об_i}}$	Полнота проработки и планирования составов работ	0 – плановая трудоемкость на отчетный месяц задач изменилась более чем на 20%, либо работы не планировались	1 – плановая трудоемкость задач по проекту не изменялась, выполнение работ планировалось	Рассчитывается по формуле (19)

Как выше было сказано, исходные значения выравнивающих коэффициентов  $K_{1,4}$  и  $K_{0,5}$  были приняты равными 1,4 и 0,5 соответственно. Эти значения были приняты по результатам проведения экспертизы среди специалистов планово-диспетчерского управления предприятия и подразделения по планированию и контролю производственной деятельности. Организация и проведение этой экспертизы осуществлялись в соответствии с методическими рекомендациями, изложенными в работах [11, 12]. Количественный и качественный подбор группы экспертов осуществлялся по рекомендациям, изложенным в работах [13-15].

Таким образом, при необходимости по результатам работы экспертов значения коэффициентов  $K_{1,4}$  и  $K_{0,5}$  могут быть скорректированы в большую или меньшую сторону в зависимости от производственной ситуации. Так, предполагается, что значение коэффициента  $K_{1,4}$  может варьироваться в пределах от 1,0 до 1,5.

### Заключение

Изложенная методика распределения премии разработана таким образом, что не определяет размер премии для структурного подразделения. Она только распределяет фонд стимулирования предприятия в рамках относительных значений по отделам в структурном подразделении, установленных бюджетным комитетом предприятия. Практическое применение методики в АО «НЦВ Миль и Камов» началось в 2023 г. совместно с методикой планирования загрузки проектно-конструкторских работ [16]. Опыт применения методики распределения премии показал ее работоспособность как инструмента повышения ритмичности работы подразделений ООКБ по выполнению производственных заказов.

### Список источников

1. Брче М.А., Омельченко И.Н., Шааб А. Устойчивое развитие: механизмы реализации. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. 169 с.
2. Модели и методы материального стимулирования (теория и практика) / О.Н. Васильева, В.В. Засканов, Д.Ю. Иванов, Д.А. Новиков. М.: ЛЕНАНД, 2007. 288 с.
3. Трушин Н.Н. Организационно-технологическая структура производственного процесса на машиностроительном предприятии. Тула: ТулГУ, 2003. 230 с.
4. Фетисов М.Н., Васин С.А., Трушин Н.Н. Проблемы и задачи производственного планирования авиастроительной отрасли // 60-я Научно-практическая конференция профессорско-преподавательского состава ТулГУ с всероссийским участием: сборник докладов конференции. Тула: Тульский государственный университет, 2024. С. 9-18.
5. Уваров И.А. Анализ и развитие подходов к составлению переменной части оплаты труда инженерно-технического персонала // Инженерный

вестник Дона. 2014. №2 (29). С. 106.

6. Уваров И.А. Расчёт переменной части оплаты труда инженерно-технических работников в отрасли тяжёлого машиностроения в условиях дефицита молодых специалистов // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2014. №8-1. С. 165-169.
7. Уваров И.А. Разработка систем премирования инженерно-технических работников в промышленности // Теория и практика общественного развития. 2016. №2. С. 49-51.
8. Иванов Д.Ю. Разработка системы материального стимулирования работников проектно-конструкторского отдела машиностроительного предприятия // Математические и инструментальные методы экономики. 2010. №9 (70). С. 252-256.
9. Ефимчик Е.Н., Ефимчик Е.В. Стимулирование работников конструкторских служб машиностроительных предприятий к обеспечению качества и сокращению сроков разработки новой техники // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия D. Экономические и юридические науки. Экономика и управление. 2012. №14. С. 25-31.
10. Фетисов М.Н., Васин С.А., Трушин Н.Н. Ранжирование проектов в портфеле заказов авиастроительного предприятия на основе квалиметрической оценки // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. Вып. 2. С. 623-628. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-2-623-624
11. Осипов Б.В., Мироянская Е.А. Математические методы и ЭВМ в стандартизации и управлении качеством. М.: Изд-во стандартов, 1990. 168 с.
12. Волков В.И. Основы теории и практики экспертной деятельности. М.: Академия менеджмента инноваций, 2003. 192 с.
13. Белоусов В.Л., Муравьев А.В., Криванов М.П. О некоторых методах отбора экспертов в организационных системах // Автоматизация и современные технологии. 1995. №3. С. 28-31.
14. Ушомирская Л.А., Чудаков А.Д. Принципы формирования групп независимых экспертов при оценке перспективности технологических нововведений // СТИН. 1996. №1. С. 22-25.
15. Жуков В.Н., Либерман А.Е. Определение численности экспертов для оценки конкурентоспособности продукции машиностроения // СТИН. 2000. №2. С. 22-23.
16. Фетисов М.Н. Формализация процесса планирования работы проектно-конструкторской организации // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. Вып. 12. С. 74-79. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-12-74-75

### References

1. Brche M.A., Omelchenko I.N., Shaab A. *Ustoychivoe razvitie: mekhanizmy realizatsii* [Sustainable development: mechanisms of implementation]. Moscow:



- Bauman Moscow State Technical University, 2020, 169 p. (In Russ.)
- Vasileva O.N., Zaskanov V.V., Ivanov D.Yu., Novikov D.A. *Modeli i metody materialnogo stimulirovaniya (teoriya i praktika)* [Models and methods of material incentives (theory and practice)]. Moscow: LENAND, 2007, 288 p. (In Russ.)
  - Trushin N.N. *Organizatsionno-tehnologicheskaya struktura proizvodstvennogo protsessa na mashinostroitel'nom predpriyatii* [An organizational and technological structure of the production process at a machine-building enterprise]. Tula: Tula State University, 2003, 230 p. (In Russ.)
  - Fetisov M.N., Vasin S.A., Trushin N.N. Problems and tasks of production planning in the aircraft industry. *60-ya Nauchno-prakticheskaya konferentsiya professorsko-prepodavatel'skogo sostava TulGU s vserossiyskim uchastiem: sbornik dokladov konferentsii* [The 60th Scientific and Practical Conference of the Teaching Staff of Tula State University with an All-Russian Participation: Collection of conference reports]. Tula: Tula State University, 2024, pp. 9-18. (In Russ.)
  - Uvarov I.A. Analysis and development of approaches to compiling the variable part of remuneration paid to engineering and technical personnel. *Inzhenerny vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don]. 2014;(2(29)):106. (In Russ.)
  - Uvarov I.A. Calculation of the variable part of the remuneration paid to engineering and technical employees in the heavy machine building industry in deficit of young specialists. *Aktualnye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk* [Current Problems of Humanities and Natural Sciences]. 2014;(8-1):165-169. (In Russ.)
  - Uvarov I.A. Development of bonus systems for engineering and technical employees in the industry. *Teoriya i praktika obshchestvennogo razvitiya* [Theory and Practice of Social Development]. 2016;(2):49-51. (In Russ.)
  - Ivanov D.Yu. Development of a system of financial incentives for employees of the design and engineering department of a machine-building enterprise. *Matematicheskie i instrumentalnye metody ekonomiki* [Mathematical and Instrumental Methods of Economics]. 2010;(9(70)):252-256. (In Russ.)
  - Efimchik E.N., Efimchik E.V. Incentives for employees of design departments of machine-building enterprises to ensure the quality and reduce the period of development of new equipment. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya D. Ekonomicheskie i yuridicheskie nauki. Ekonomika i upravlenie* [Bulletin of Polotsk State University. Series D. Economic and Legal Sciences. Economics and Management]. 2012;(14):25-31. (In Russ.)
  - Fetisov M.N., Vasin S.A., Trushin N.N. Ranking of projects in the order portfolio of an aircraft manufacturer based on qualimetric evaluation. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Technical Sciences]. 2024;(2):623-628. (In Russ.) DOI:10.24412/2071-6168-2024-2-623-624
  - Osipov B.V., Mirovskaya E.A. *Matematicheskie metody i EVM v standartizatsii i upravlenii kachestvom* [Mathematical methods and computers in standardization and quality management]. Moscow: Publishing House of Standards, 1990, 168 p. (In Russ.)
  - Volkov V.I. *Osnovy teorii i praktiki ekspertnoy deyatel'nosti* [Fundamentals of theory and practice of expert activities]. Moscow: Academy of Innovation Management, 2003, 192 p. (In Russ.)
  - Belousov V.L., Muravev A.V., Krivanov M.P. On some methods of selecting experts in organizational systems. *Avtomatizatsiya i sovremennye tekhnologii* [Automation and Modern Technologies]. 1995;(3):28-31. (In Russ.)
  - Ushomirskaya L.A., Chudakov A.D. Principles of forming groups of independent experts when assessing the prospects of technological innovations. *STIN* [Russian Engineering Research]. 1996;(1):22-25. (In Russ.)
  - Zhukov V.N., Liberman A.E. Determining the number of experts to assess competitiveness of engineering products. *STIN* [Russian Engineering Research]. 2000;(2):22-23. (In Russ.)
  - Fetisov M.N. Formalization of the process of planning the operation of the design and development organization. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Technical Sciences]. 2023;(12):74-79. (In Russ.) DOI:10.24412/2071-6168-2023-12-74-75

Поступила 19.05.2024; принята к публикации 13.06.2024; опубликована 30.09.2024  
Submitted 19/05/2024; revised 13/06/2024; published 30/09/2024

**Васин Сергей Александрович** – доктор технических наук, профессор,  
Тульский государственный университет, Тула, Россия.  
Email: vasin\_sa53@mail.ru. ORCID 0009-0008-6737-7909

**Фетисов Михаил Николаевич** – заместитель исполнительного директора,  
АО «НЦВ Миль и Камов», Томилино, Московская область, Россия.  
Email: mkhl.ftsv@gmail.com. ORCID 0009-0009-8952-5068

**Трушин Николай Николаевич** – доктор технических наук, доцент,  
Тульский государственный университет, Тула, Россия.  
Email: trunikolaj@yandex.ru. ORCID 0000-0001-7974-3832

**Sergej A. Vasin** – DrSc (Eng.), Professor,  
Tula State University, Tula, Russia.  
Email: vasin\_sa53@mail.ru. ORCID 0009-0008-6737-7909

**Mikhail N. Fetisov** – Deputy Executive Director,  
JSC National Helicopter Center Mil and Kamov, Tomilino, Moscow Region, Russia.  
Email: mkhl.ftsv@gmail.com. ORCID 0009-0009-8952-5068

**Nikolaj N. Trushin** – DrSc (Eng.), Associate Professor,  
Tula State University, Tula, Russia.  
Email: trunikolaj@yandex.ru. ORCID 0000-0001-7974-3832



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)  
УДК 005:658.5  
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-3-131-139

## ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СТРУКТУРНЫХ МОДЕЛЕЙ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ IDEF3

Ивахненко А.Г.<sup>1</sup>, Аникеева О.В.<sup>2</sup>, Исламова О.В.<sup>3</sup>, Разумова А.И.<sup>1</sup>, Гуляев К.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия

<sup>2</sup> Федеральное казенное предприятие «Курская биофабрика – фирма «БИОК», Курск, Россия

<sup>3</sup> Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик, Россия

**Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы).** При графическом описании процессов системы менеджмента качества (СМК) достаточно широкое применение нашла методология IDEF. При этом предпочтение отдается нотации IDEF0 по сравнению с нотацией IDEF3. Сами эти методологии и соответствующие им нотации не включают в себя средства для преобразования графических моделей в математические модели. Имеются подходы для определения вероятностей выполнения работ, входящих в сеть взаимосвязанных и взаимодействующих процессов для нотации IDEF0. Нотация IDEF3 поддерживает более детальное описание взаимодействия работ в процессах за счет прямого использования логических условий с учетом временных показателей и является перспективной для создания математических моделей на ее основе. **Цель работы и методы исследования.** В статье выполнен анализ параметров вероятности и времени выполнения взаимосвязанных и взаимодействующих процессов СМК на основе их графических IDEF3-моделей. Были использованы основные положения теории вероятностей и приемы исследования структурных схем надежности технических систем. **Новизна. Результаты.** Предложен подход к прямому преобразованию структурных схем взаимодействующих процессов на основе графических IDEF3-моделей в выражения для определения вероятностей и времени выполнения всей сети процессов. Применение этого подхода реализовано на трех абстрактных примерах, содержащих основные элементы таких графических моделей. Численные расчеты подтвердили возможность учета обратных связей в сети процессов, присущих всем действующим СМК на основе цикла Шухарта-Деминга. **Практическая значимость.** Созданный подход позволяет использовать накопленные знания о взаимосвязях процессов, отраженных только в графических схемах для назначения требований к качеству (вероятности успешного выполнения) и длительности к каждой работе, входящей в процесс, исходя из его принятой структуры. Этот подход может найти применение для анализа схем процессов СМК на основе непосредственного вычисления параметров вероятности и времени при определении источников повышения их результативности и эффективности.

**Ключевые слова:** процессы СМК, графические модели IDEF3, математические модели, вероятность, время выполнения

© Ивахненко А.Г., Аникеева О.В., Исламова О.В., Разумова А.И., Гуляев К.А., 2024

### Для цитирования

Параметрический анализ структурных моделей взаимодействующих процессов на основе IDEF3 / Ивахненко А.Г., Аникеева О.В., Исламова О.В., Разумова А.И., Гуляев К.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №3. С. 131-139. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-131-139>



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

## PARAMETRIC ANALYSIS OF STRUCTURAL MODELS OF INTERACTING PROCESSES BASED ON IDEF3

Ivakhnenko A.G.<sup>1</sup>, Anikeeva O.V.<sup>2</sup>, Islamova O.V.<sup>3</sup>, Razumova A.I.<sup>1</sup>, Gulyaev K.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Southwest State University, Kursk, Russia

<sup>2</sup> Federal State-Owned Enterprise Kursk Biofactory – Company BИOK, Kursk, Russia

<sup>3</sup> Berbekov Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, Russia

**Abstract. Problem Statement (Relevance).** The IDEF methodology has been widely used in the graphical description of the processes of the quality management system (QMS). In this case, preference is given for the IDEF0 notation over the IDEF3 notation. These methodologies and their corresponding notations do not include tools for converting graphical models into mathematical ones. There are approaches to determining the probabilities of the activity being performed that are part of a network of interconnected and interacting processes for the IDEF0 notation. The IDEF3 notation supports a more detailed description of the interaction of the activity in processes through the direct use of logical conditions taking into account time indicators, and this is promising for creating mathematical models based on it. **Objective and Methods Applied.** The article analyzes the probability and execution time parameters of interrelated and interacting QMS processes based on their IDEF3 graphical models. The authors used main provisions of probability theory and techniques for studying structural charts of reliability of technical systems. **Originality. Results.** The article proposes an approach to the direct transformation of structural charts of interacting processes based on IDEF3 graphical models into expressions for determining the probabilities and execution time of the entire process network. This approach is applied for three abstract examples containing the main elements of such graphical models. Numerical calculations have confirmed the possibility of taking into account feedbacks in the network of processes characteristic of all operating QMS based on the Shewhart-Deming cycle. **Practical Relevance.** The created approach uses accumulated knowledge about the interrelations between processes, reflected in graphical charts only to assign quality requirements (probability of successful completion) and duration to every activity included in the process, based on its accepted structure. This approach can be used to analyze the charts of QMS processes based on the direct calculation of probability and time parameters in determining the sources of increasing their effectiveness and efficiency.

**Keywords:** QMS processes, IDEF3 graphical models, mathematical models, probability, execution time

### For citation

Ivakhnenko A.G., Anikeeva O.V., Islamova O.V., Razumova A.I., Gulyaev K.A. Parametric Analysis of Structural Models of Interacting Processes Based on IDEF3. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 3, pp. 131-139. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-131-139>

### Введение

При создании и совершенствовании систем менеджмента качества (СМК) предприятий и организаций используют разные методы и инструменты. Общим для них является то, что они поддерживают реализацию принципов системного и процессного подходов [1]. Для отражения деятельности предприятия как системы взаимосвязанных и взаимодействующих процессов используют различные нотации. Широкое применение получили методологии IDEF, включающие в себя несколько средств графического представления и анализа процессов [2]. Из всех средств методологии IDEF наиболее часто применяют методологию функционального моделирования IDEF0. Гораздо меньшее распространение получила методология документирования процессов IDEF3. Общей чертой этих методологий является то, что сами они не включают в свой состав средств для преобразования графических моделей в математические модели. Это не позволяет применять их непосредственно для

обоснования выбора из различных вариантов решений, поддерживающих различные направления совершенствования СМК. Важность применения математических моделей для такого совершенствования несомненна при цифровой трансформации предприятий [3, 4], например для решения задач практической стандартизации [5] и других задач. Тем не менее большой объем информации, содержащийся в графических моделях IDEF0 и IDEF3 о процессах СМК, их взаимосвязях и взаимодействии, является основой для разработки способов их использования при разработке соответствующих математических моделей.

В работе [6] было указано на схожесть моделей IDEF0 и моделей структурных схем надежности сложных технических систем [7], на основе которой были представлены зависимости для оценки вероятности безотказной работы. Основным недостатком представленного подхода в [6] является предположение о линейном развитии процессов от начального этапа до конечного этапа, без учета обратных связей, характерных для СМК, реализующих цикл Шухарта-Деминга.

Использование графических моделей IDEF0 для расчета рисков рассмотрено в работах [8, 9] на основе прямого перехода от функциональных блоков моделей к уравнениям вероятности выполнения функций этих блоков с учетом прямых и обратных связей между ними. Предложенный в этих работах подход является оригинальным и существенно дополняет набор известных методов риск-менеджмента [10].

В диаграммах IDEF3 в отличие от диаграмм IDEF0 существуют переходы с разными логическими условиями, подобными тем, что используются при расчетах структурной надежности технических систем [10], но дополненных учетом времени их срабатывания. Некоторые возможности использования графических диаграмм IDEF3 для построения математических моделей процессов рассмотрены в работах [11, 12]. В работе [10] вероятностный анализ состояний рассмотрен только для потоковых технологических процессов, в котором внимание уделено срабатыванию асинхронного соединения «ИЛИ», а не выполнению работ как элементов процесса. Потоковые модели технологических процессов также рассмотрены в [12], где была определена проводимость цепочки работ. Основное внимание в этой работе уделено поиску «узких» мест в потоковых технологических процессах, но выполнен учет обратной связи, но только для одной работы, замкнутой саму на себя.

На основе вышеизложенного перспективным представляется использование графических диаграмм IDEF3 для построения математических моделей взаимосвязанных и взаимодействующих процессов СМК для определения вероятности и времени их выполнения.

Целью работы является анализ параметров вероятности и времени выполнения взаимосвязанных и взаимодействующих процессов СМК на основе их графических IDEF3-моделей.

### Материалы и методы исследования

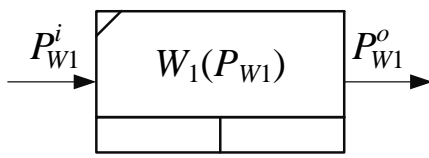
Для достижения поставленной цели будем использовать метод описания Process Flow Description (PFD), реализующий описание процессов, с указанием того, что происходит на каждом этапе, графическое представление которого осуществляется через Process Flow Description Diagrams (PFDD) – диаграммы Описания Последовательности Этапов Процесса. В IDEF3-моделях отсутствуют ограничения на количество блоков на диаграмме. Рассмотрим основные блоки PFDD и их параметры вероятности и времени.

Блок работы (действия) имеет только один вход и один выход, что позволяет соотнести вероятность выхода с вероятностью входа и вероятностью выполнения самой работы. Характеристики этого блока представлены в табл. 1.

Полагая, что  $P_{W1}^i = 1$ , получим, что вероятность на выходе из блока будет равна вероятности выполнения работы  $P_{W1}^o = P_{W1}$ , то есть характеристику собственно самого блока работы.

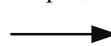
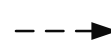
В табл. 2 представлены характеристики связей (стрелок), в которые не включена связь объектного потока, поскольку ее параметры аналогичны временному предшествованию, но она предназначена для отражения передачи объектов между работами (отчетов и т.п.). Такого рода детализация не соответствует поставленной цели данной работы.

Таблица 1. Параметры блока работы  
Table 1. Parameters of the activity block

Блок работы	Вероятность	Время
	$P_{W1}^o$ – вероятность на выходе из блока. $P_{W1}^o = P_{W1}^i P_{W1}$ , где $P_{W1}^i$ – вероятность на входе в блок; $P_{W1}$ – вероятность выполнения работы $W1$ (при заданной длительности; в установленные сроки)	$t_{W1}$ – длительность выполнения работы $W1$ . $t_{W1} = t_{W1}^f - t_{W1}^s$ , где $t_{W1}^f$ – время завершения выполнения работы; $t_{W1}^s$ – время начала выполнения работы

Примечание. Обозначения соответствуют:  $W$  – работа (work),  $i$  – вход (input),  $o$  – выход (output),  $s$  – начало (start),  $f$  – завершение (finish).

Таблица 2. Параметры связей  
Table 2. Parameters of links

Связи	Связи между блоками	Вероятность	Время
Временное предшествование 	$P_{W1}^o \rightarrow P_{W2}^i$	$P_{W2}^i = P_{W1}^o$	$t_{W2}^s \geq t_{W1}^f$
Нечеткое отношение 	$P_{W1}^o \dashrightarrow P_{W2}^i$	$P_{W2}^i = P_{W1}^o$ , $0 \leq P_{W2}^i \leq P_{W1}^o$	$t_{W2}^s \geq t_{W1}^f \vee$ $t_{W2}^s \geq t_{W1}^f \wedge t_{W2}^s \geq t_{W1}^f$ , $t_{W1}^f \geq t_{W2}^s \geq t_{W1}^s$

Для связей с нечетким отношением в том случае, если последующая работа  $W_2$  заканчивается ранее предшествующей работы  $W_1$ , то соответствующая вероятность лежит в диапазоне  $0 \leq P_{W_2}^i \leq P_{W_1}^o$ . В общем случае ее численное значение  $P_{W_2}^i$  будет определяться экспертным путем. Но можно дать следующую оценку, основанную на том предположении, что вероятность  $P_{W_2}^i$  при незавершенной работе  $W_1$  и завершенной работе  $W_2$  равномерно распределена во времени:

$$P_{W_2}^i = \frac{t_{W_1}^f - t_{W_2}^f}{t_{W_1}}. \quad (1)$$

Преимущество графических диаграмм IDEF3 состоит в наличии соединений (перекрестков), позволяющих оценивать логическую последовательность выполнения работ и учитывать время и вероятности их успешного завершения.

В табл. 3 представлены характеристики соединений. Все соединения на диаграмме должны иметь номер с префиксом  $J$ .

Таблица 3. Параметры соединений  
Table 3. Parameters of junctions

Соединения	Соединения между блоками	Вероятность	Время
Асинхронное соединение «И»		$P_{J_1} = P_{W_1}^o P_{W_2}^o$	$t_{W_3}^s \geq t_{W_1}^f \wedge t_{W_3}^s \geq t_{W_2}^f$ , либо в другой форме $t_{W_3}^s \geq \max(t_{W_1}^f, t_{W_2}^f)$
		$P_{W_2}^i = P_{J_1} = P_{W_1}^o$ , $P_{W_3}^i = P_{J_1} = P_{W_1}^o$	$T_{\max} \geq t_{W_2}^s \geq t_{W_1}^o \wedge$ $T_{\max} \geq t_{W_3}^s \geq t_{W_1}^o$
Синхронное соединение «И»		$P_{J_1} = P_{W_1}^o P_{W_2}^o$	$t_{W_3}^s \geq t_{W_1}^f = t_{W_2}^f$
		$P_{W_2}^i = P_{J_1} = P_{W_1}^o$ , $P_{W_3}^i = P_{J_1} = P_{W_1}^o$	$t_{W_2}^s = t_{W_3}^s \geq t_{W_1}^f$
Асинхронное соединение «ИЛИ»		$P_{J_1} = 1 - (1 - P_{W_1}^o)(1 - P_{W_2}^o)$	$t_{W_3}^s \geq t_{W_1}^f \wedge t_{W_3}^s \geq t_{W_2}^f$ , либо в другой форме $t_{W_3}^s \geq \min(t_{W_1}^f, t_{W_2}^f)$
		$P_{W_2}^i = P_{J_1} = P_{W_1}^o \wedge P_{W_3}^i = 0 \vee$ $P_{W_3}^i = P_{J_1} = P_{W_1}^o \wedge P_{W_2}^i = 0 \vee$ $P_{W_2}^i = P_{W_3}^i = P_{J_1} = P_{W_1}^o$	$T_{\max} \geq t_{W_2}^s \geq t_{W_1}^o \vee$ $T_{\max} \geq t_{W_3}^s \geq t_{W_1}^o$
Синхронное соединение «ИЛИ»		$P_{J_1} = 1 - (1 - P_{W_1}^o)(1 - P_{W_2}^o)$	$t_{W_3}^s \geq t_{W_1}^f = t_{W_2}^f$
		$P_{W_2}^i = P_{J_1} = P_{W_1}^o \wedge P_{W_3}^i = 0 \vee$ $P_{W_3}^i = P_{J_1} = P_{W_1}^o \wedge P_{W_2}^i = 0 \vee$ $P_{W_2}^i = P_{W_3}^i = P_{J_1} = P_{W_1}^o$	$t_{W_2}^f = t_{W_3}^f$ , $T_{\max} \geq t_{W_2}^s \geq t_{W_1}^o$
Соединение «эксклюзивное «ИЛИ»		$P_{W_3}^i = P_{J_1} = P_{W_1}^o \wedge P_{W_2}^i = 0 \vee$ $P_{W_3}^i = P_{J_1} = P_{W_2}^o \wedge P_{W_1}^i = 0$	$t_{W_3}^s \geq t_{W_1}^f \vee t_{W_3}^s \geq t_{W_2}^f$
		$P_{W_2}^i = P_{J_1} = P_{W_1}^o \wedge P_{W_3}^i = 0 \vee$ $P_{W_3}^i = P_{J_1} = P_{W_1}^o \wedge P_{W_2}^i = 0$	$t_{W_2}^s \geq t_{W_1}^f \vee t_{W_3}^s \geq t_{W_1}^f$

Примечание.  $T_{\max}$  – максимальная величина времени, введена для действующих процессов и СМК вместо правильного, но формального значения времени, равного бесконечности ( $\infty$ ).

Примененные в табл. 3 логические знаки «ИЛИ» (V) позволяют определить параметры вероятности и времени в соответствии с графическими диаграммами, отражающими возможности различных сценариев реализации процессов.

**Полученные результаты и их обсуждение**

Рассмотрим возможности предложенного инструмента параметрического анализа структурных моделей взаимодействующих процессов, определенных в IDEF3, на следующих примерах, в которых перекрестки не нумерованы, чтобы не усложнять чтение диаграмм.

**Пример 1.** Схема процессов, представленная на рис. 1, имеет последовательную структуру с разветвлением и соединением.

В табл. 4 представлена последовательность расчета параметров для рассматриваемой структуры процессов.

Результат расчета по табл. 4 представим следующими выражениями:

$$P_6 = P_0^2 P_{W1}^2 P_{W2} P_{W3} P_{W4}, \tag{2}$$

$$T \geq t_{W1} + \max(t_{W2}, t_{W3}) + t_{W4}, \tag{3}$$

где  $T$  – время завершения всех работ.

Видимым отличием от известных зависимостей для вероятностей безотказной работы, полученных с использованием структурных схем надежности [6, 7], является наличие степеней у вероятностей  $P_0$  и  $P_{W1}$  в выражении (2), что обусловлено парностью разветвления и слияния стрелок в асинхронном соединении «И».

**Пример 2.** Схема процессов, представленная на рис. 2, имеет последовательную структуру с разветвлением и соединением, включающую обратную связь и нечеткое отношение.

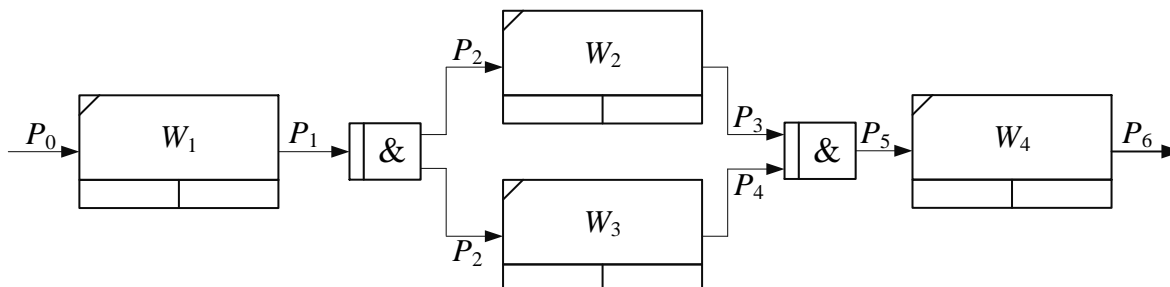


Рис. 1. Схема последовательной структуры процессов  
Fig. 1. A diagram of the sequential structure of processes

Таблица 4. Расчет параметров для структуры процессов по рис. 1  
Table 4. Calculation of parameters for the process structure according to Fig. 1

№ п/п	Вероятность	Время
1	$P_1 = P_0 P_{W1}$	$t_{W1}^s = 0, t_{W1}^f = t_{W1}$
2	$P_2 = P_1$	$t_{W2}^s \geq t_{W1}^f \wedge t_{W3}^s \geq t_{W1}^f$
3	$P_3 = P_2 P_{W2}, P_4 = P_2 P_{W3}$	$t_{W2}^s \geq t_{W1}^f \wedge t_{W3}^s \geq t_{W1}^f, t_{W2}^f = t_{W2}^s + t_{W2}, t_{W3}^f = t_{W3}^s + t_{W3}$
4	$P_5 = P_3 P_4$	$t_{W4}^s \geq t_{W2}^f \wedge t_{W4}^s \geq t_{W3}^f$
5	$P_6 = P_5 P_{W4}$	$t_{W4}^s \geq t_{W2}^f \wedge t_{W4}^s \geq t_{W3}^f, t_{W4}^f = t_{W4}^s + t_{W4}$

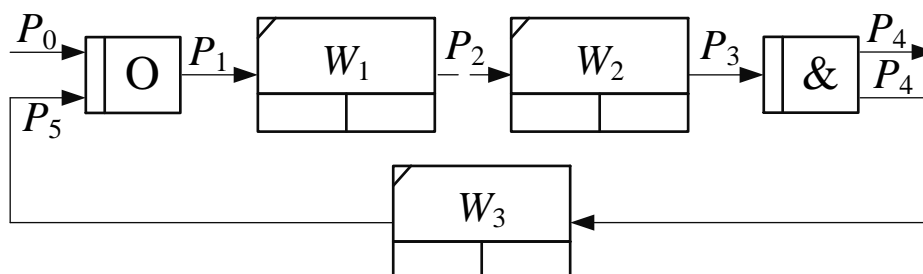


Рис. 2. Схема структуры процессов с обратной связью и нечетким отношением  
Fig. 2. A diagram of the structure of processes with a feedback and a fuzzy relation

В табл. 5 представлена последовательность расчета параметров для рассматриваемой структуры процессов только для первого цикла, то есть при  $t_{w1}^s = 0$ .

Таблица 5. Расчет параметров для структуры процессов по рис. 2  
Table 5. Calculation of parameters for the process structure according to Fig. 2

№ П/П	Вероятность	Время
1	$P_1 = 1 - (1 - P_0)(1 - P_5)$	$t_{w1}^s = 0$
2	$P_2 = P_1 P_{W1}$	$t_{w1}^s = 0, t_{w1}^f = t_{W1}$
3.1	$P_3 < P_2 P_{W2}$	$t_{w2}^s \geq t_{w1}^s, t_{w2}^f \geq t_{w1}^f$
3.2	$P_3 = P_2 P_{W2}$	$t_{w2}^f \geq t_{w1}^f$
4	$P_4 = P_3$	$t_{w2}^f \geq t_{w1}^s + t_{W2} \vee t_{w2}^f > t_{w1}^f$
5	$P_5 = P_4 P_{W3}$	$t_{w3}^s \geq t_{w2}^f, t_{w3}^f = t_{w3}^s + t_{W3}$

При выполнении временных условий по п.3.1 табл. 5 значения вероятностей будут подчиняться следующим соотношениям:

$$P_4 < P_{W1} P_{W2}; P_5 < P_{W1} P_{W2} P_{W3}; P_1 = 1 - (1 - P_0)(1 - P_5), \quad (4)$$

а при выполнении временных условий по п. 3.2:

$$P_4 = P_{W1} P_{W2}; P_5 = P_{W1} P_{W2} P_{W3}; P_1 = 1 - (1 - P_0)(1 - P_5). \quad (5)$$

Время завершения первого цикла  $T_1$  будет подчиняться следующим условиям:

– для зависимостей (4)

$$T_1 \geq t_{W2} + t_{W3}; \quad (6)$$

– для зависимостей (5)

$$T_1 \geq t_{W1} + t_{W2} + t_{W3}. \quad (7)$$

В этом примере показана только возможность определения параметров процессов при наличии обратной связи. В следующем примере будет рассмотрен учет обратной связи при нескольких циклах выполнения работ.

**Пример 3.** Более сложная схема процессов, представленная на рис. 3, имеет последовательную струк-

туру с разветвлениями и соединениями, включающую обратную связь и только связи временного предшествования.

В табл. 6 представлена последовательность расчета параметров для рассматриваемой структуры процессов только для первого цикла, как и в предыдущем примере.

Необходимость введения новых обозначений  $t(P_{14})$  и  $t(P_{15})$  в табл. 6 обусловлена самой структурой, приведенной на рис. 3. В отличие от предыдущих примеров здесь имеется несколько последовательных соединений.

Расчет параметров для рассматриваемой структуры процессов представлен рекурсивными соотношениями для вероятностей  $P_1$  и  $P_{15}$ , полученными для первого цикла и последующих циклов, учитывающих наличие обратной связи:

$$P_1 = 1 - (1 - P_0)(1 - P_{15}); \quad (8)$$

$$P_{15} = P_1^9 P_{W1}^3 P_{W2}^3 P_{W3}^3 P_{W4}^3 P_{W5} P_{W6} P_{W7}. \quad (9)$$

Для первого цикла в выражении (8) полагаем  $P_{15} = 0$ , то есть  $P_1 = P_0$ , и выполняем расчет вероятности  $P_{15}$  по выражению (9). Полученное значение вероятности  $P_{15}$  используем в выражении (8) для нахождения вероятности  $P_1$ , которое применяем для определения вероятности  $P_{15}$  по выражению (9) и т.д.

Результаты моделирования рассматриваемой схемы структуры процессов на основе применения выражений (8) и (9) при различных значениях вероятностей  $P_0$  и  $P_{Wi}$  ( $i = 1, \dots, 7$ ) приведены в табл. 7.

Полученные результаты численного моделирования отражают влияние обратной связи с асинхронным соединением «ИЛИ» на увеличение выходной вероятности  $P_{15}$ , определяемой выражением (8). Наиболее значимое увеличение вероятности  $P_{15}$  происходит после выполнения второго цикла, что соответствует выражению (8). Из выражения (9) видно, что на само значение величины вероятности  $P_{15}$  наибольшее влияние оказывают значения вероятностей на выходе из блоков  $W1, W2, W3$  и  $W4$ .

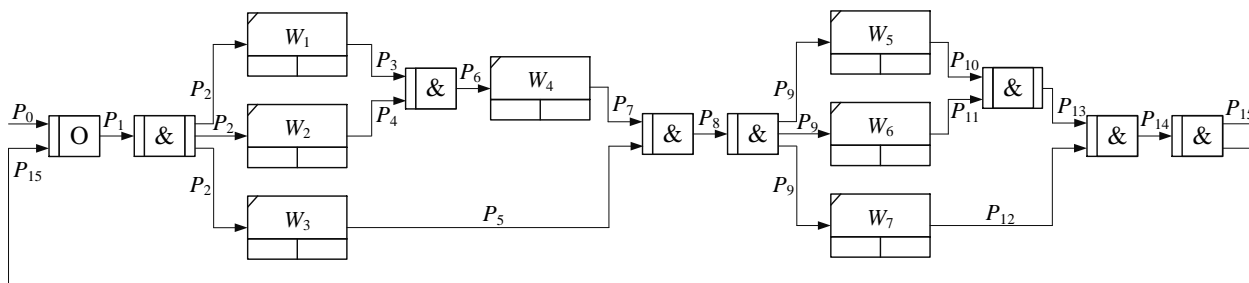


Рис. 3. Схема структуры процессов с обратной связью  
Fig. 3. A diagram of the feedback process structure



Таблица 6. Расчет параметров для структуры процессов по рис. 3  
 Table 6. Calculation of parameters for the process structure according to Fig. 3

№ п/п	Вероятность	Время
1	$P_1 = 1 - (1 - P_0)(1 - P_{15})$	$t_{W1}^s = 0, t_{W2}^s = 0, t_{W3}^s = 0$
2	$P_2 = P_1$	$t_{W1}^s = 0, t_{W2}^s = 0, t_{W3}^s = 0$
3	$P_3 = P_2 P_{W1}$	$t_{W1}^s = 0, t_{W1}^f = t_{W1}$
4	$P_4 = P_2 P_{W2}$	$t_{W2}^s = 0, t_{W2}^f = t_{W2}$
5	$P_5 = P_2 P_{W3}$	$t_{W3}^s = 0, t_{W3}^f = t_{W3}$
6	$P_6 = P_3 P_4$	$t_{W4}^s \geq t_{W1}^f \wedge t_{W4}^s \geq t_{W2}^f$
7	$P_7 = P_6 P_{W4}$	$t_{W4}^f = t_{W4}^s + t_{W4}$
8	$P_8 = P_5 P_7$	$t_{W5}^s \geq t_{W3}^f \wedge t_{W5}^s \geq t_{W4}^f \wedge t_{W5}^s \geq t_{W6}^f \wedge t_{W5}^s \geq t_{W7}^f \wedge t_{W5}^s \geq t_{W3}^f \wedge t_{W5}^s \geq t_{W6}^f$
9	$P_9 = P_8$	$t_{W5}^s \geq t_{W3}^f \wedge t_{W5}^s \geq t_{W4}^f \wedge t_{W5}^s \geq t_{W6}^f \wedge t_{W5}^s \geq t_{W7}^f \wedge t_{W5}^s \geq t_{W3}^f \wedge t_{W5}^s \geq t_{W6}^f$
10	$P_{10} = P_9 P_{W5}$	$t_{W5}^f = t_{W5}^s + t_{W5}, t_{W5}^f = t_{W6}^f$
11	$P_{11} = P_9 P_{W6}$	$t_{W6}^f = t_{W6}^s + t_{W6}, t_{W5}^f = t_{W6}^f$
12	$P_{12} = P_9 P_{W7}$	$t_{W7}^f = t_{W7}^s + t_{W7}$
13	$P_{13} = P_{10} P_{11}$	$t_{W5}^f = t_{W6}^f$
14	$P_{14} = P_{12} P_{13}$	$t(P_{14}) \geq \max(t_{W5}^f = t_{W6}^f, t_{W7}^f)$
15	$P_{15} = P_{14}$	$t(P_{15}) \geq t(P_{14})$

Примечание. Здесь введены новые обозначения  $t(P_{14})$  и  $t(P_{15})$  – время срабатывания соединений, на выходе которых формируются вероятности  $P_{14}$  и  $P_{15}$  соответственно.

Таблица 7. Результаты моделирования для структуры процессов по рис. 3  
 Table 7. Simulation results for the process structure according to Fig. 3

Шаг	$P_0 = 0,99; P_{Wi} = 0,95$		$P_0 = 0,99; P_{Wi} = 0,99$		$P_0 = 0,997; P_{Wi} = 0,997$	
	$P_1$	$P_{15}$	$P_1$	$P_{15}$	$P_1$	$P_{15}$
1	0,99	0,4232	0,99	0,7857	0,997	0,9304
2	0,9942	0,4398	0,9979	0,8436	0,9998	0,9541
3	0,9944	0,4404	0,9984	0,8480	0,9999	0,9547
4	0,9944	0,4405	0,9985	0,8484	0,9999	0,9548
5	0,9944	0,4405	0,9985	0,8484	0,9999	0,9548

### Заключение

Результатом выполненного исследования является разработка нового инструмента качества, позволяющего проводить анализ параметров вероятности и времени выполнения взаимосвязанных и взаимодействующих процессов СМК по их графическим IDEF3-моделям. В отличие от распространенного представления, IDEF3-модели могут быть использованы для анализа не только технологических процессов. Разработанный инструмент качества:

1) предоставляет более широкие возможности для анализа процессов по сравнению с непосредственным применением структурных схем надежности, разработанных для технических систем;

2) позволяет учитывать обратные связи, всегда имеющиеся в действующих СМК, реализующих цикл PDCA (PDSA);

3) поддерживает назначение требований к качеству (вероятности успешного выполнения) и дли-

тельности к каждой работе, входящей в процесс, исходя из его принятой структуры;

4) может найти применение для анализа схем взаимосвязей и взаимодействия процессов СМК на основе непосредственного вычисления параметров вероятности и времени и источников повышения их результативности и эффективности.

Направлением дальнейших исследований является верификация и валидация предложенного инструмента качества по моделям процессов, опубликованным в открытой печати, а также его применение для анализа действующих СМК предприятий.

### Список источников

1. Управление качеством продукции, процессов, услуг: учеб. пособие / Аникеева О.В., Еренков О.Ю., Ивахненко А.Г., Сторублев М.Л. Курск: ЮЗГУ, 2016. 426 с.

2. Черемных С.В., Семенов И.О., Ручкин В.С. Моделирование и анализ систем. IDEF-технологии: практикум. М.: Финансы и статистика, 2006. 192 с.
3. Маликов А.А., Козловский В.Н., Васин С.А. Перспективы развития процессов управления качеством производства в условиях цифровой трансформации // СТИН. 2022. № 1. С. 48-52.
4. Запорожцев А.В., Хазова Вер. И., Хазова Вик. И. Ключевые аспекты создания цифрового двойника процесса системы менеджмента качества // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №4. С. 105-116. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-105-116>.
5. Полякова М.А., Извеков Ю.А., Дрягун Э.П. Использование математических моделей в области практической стандартизации // Качество. Инновации. Образование. 2023. № 5(187). С. 69-77. DOI: 10.31145/1999-513x-2023-5-69-77
6. Larson N., Kusiak A. System Reliability Methods for Analysis of Process Models // Integrated Computer-Aided Engineering. 1996, vol. 3, no. 4, pp. 279-290.
7. Хенли Дж., Кумамото Хиромицу. Надежность технических систем и оценка риска / пер. с англ. В.С. Сыромятников, Г.С. Деминой; под общ. ред. В. С. Сыромятникова. М.: Машиностроение, 1984. 528 с.
8. Разработка подхода к расчету рисков на основе функциональной модели IDEF0 / Жилиев А.А., Ивахненко А.Г., Исламова О.В., Афанасьев П.А., Денисов Д.А., Хуштова А.Р. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. №4. С. 324-327. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-4-324-328
9. Использование функциональной модели IDEF0 для расчёта рисков / Аникеева О.В., Жилиев А.А., Ивахненко А.Г., Исламова О.В., Козловский В.Н. // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2022. №5 (355). С. 89-98. DOI: 10.33979/2073-7408-2022-355-5-89-98
10. Картвелишвили В.М., Свиридова О.А. Риск-менеджмент. Методы оценки риска: учеб. пособие. М.: ФГБОУ ВО «РЭУ им. Г.В. Плеханова», 2017. 120 с.
11. Бритов Г.С., Лупал А.В. Вероятностный анализ состояний IDEF3-моделей технологических процессов // Информационно-управляющие системы. 2009. №5. С. 21-24.
12. Осипова Т.Ф. Анализ потоков в бизнес-процессах по IDEF3-моделям // Актуальные проблемы экономики и управления. 2015. №4(8). С. 155-162.
2. Cheremnykh S.V., Semenov I.O., Ruchkin V.S. *Modelirovaniye i analiz sistem. IDEF-tehnologii: praktikum* [Modeling and analysis of systems. IDEF technologies: tutorial]. Moscow: Finansy i statistika, 2006, 192 p. (In Russ.)
3. Malikov A.A., Kozlovskii V.N., Vasin S.A. Prospects for the development of production quality management processes in the context of digital transformation. *STIN* [Russian Engineering Research]. 2022;(1):48-52. (In Russ.)
4. Zaporozhtsev A.V., Khazova Ver.I., Khazova Vik.I. Key aspects of creating a digital twin of the quality management system process. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023;21(4):105-116. (In Russ.) <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-105-116>
5. Polyakova M.A., Izvekov Yu.A., Dryagun E.P. Use of mathematical models in the area of practical standardization. *Kachestvo. Innovatsii. Obrazovanie* [Quality. Innovation. Education]. 2023;(5(187)):69-77. (In Russ.) DOI 10.31145/1999-513x-2023-5-69-77
6. Larson N., Kusiak A. System reliability methods for analysis of process models. *Integrated Computer-Aided Engineering*. 1996;3(4):279-290.
7. Henley E.J., Kumamoto H. *Nadezhnost tekhnicheskikh sistem i otsenka riska* [Reliability engineering and risk assessment]. Translated from English by Syromyatnikov V.S., Demina G.S.; edited by Syromyatnikov V. S. Moscow: Mashinostroenie, 1984, 528 p. (In Russ.)
8. Zhilyaev A.A., Ivakhnenko A.G., Islamova O.V., Afanasyev P.A., Denisov D.A., Khushtova A.R. Development of an approach to the calculation of risks on the basis of the IDEF0 functional model. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Technical Sciences]. 2022;(4):324-327. (In Russ.) DOI: 10.24412/2071-6168-2022-4-324-328
9. Anikeeva O.V., Zhilyaev A.A., Ivakhnenko A.G., Islamova O.V., Kozlovsky V.N. Using the IDEF0 functional model to calculate risks. *Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii* [Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology]. 2022;(5(355)):89-98. (In Russ.) DOI: 10.33979/2073-7408-2022-355-5-89-98
10. Kartvelishvili V.M., Sviridova O.A. *Risk-menedzhment. Metody otsenki riska: uchebnoe posobie* [Risk management. Risk assessment methods: study guide]. Moscow: Plekhanov Russian University of Economics, 2017, 120 p. (In Russ.)
11. Britov G.S., Lupal A.V. Probability analysis of IDEF3 model states of technological processes. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy* [Information and Control Systems]. 2009;(5):21-24. (In Russ.)
12. Osipova T.F. Flow analysis in business processes by IDEF3 models. *Aktualnye problemy ekonomiki i upravleniya* [Currently Relevant Issues of Economics and Management]. 2015;(4(8)):155-162. (In Russ.)

### References

1. Anikeeva O.V., Erenkov O.Yu., Ivakhnenko A.G., Storablev M.L. *Upravlenie kachestvom produktsii, protsessov, uslug: uchebnoe posobie* [Quality management of products, processes, services: study guide]. Kursk: Southwest State University, 2016, 426 p. (In Russ.)

Поступила 31.03.2024; принята к публикации 08.04.2024; опубликована 30.09.2024  
Submitted 31/03/2024; revised 08/04/2024; published 30/09/2024

**Ивахненко Александр Геннадьевич** – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, профессор, Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия.  
Email: ivakhnenko2002@mail.ru. ORCID 0000-0002-9798-993X

**Аникеева Олеся Владимировна** – кандидат технических наук, доцент, специалист по качеству, Федеральное казенное предприятие «Курская биофабрика – фирма «БИОК», Курск, Россия.  
Email: olesya-anikeeva@yandex.ru. ORCID 0000-0001-7907-451X

**Исламова Оксана Владимировна** – кандидат технических наук, доцент, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик, Россия.  
Email: islamova\_81@mail.ru.

**Разумова Анна Ивановна** – аспирант, Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия.  
Email: belkarazym@mail.ru.

**Гуляев Кирилл Андреевич** – аспирант, Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия.  
Email: gulyaev1997@mail.ru.

**Alexander G. Ivakhnenko** – DrSc (Eng.), Lead Researcher, Professor, Southwest State University, Kursk, Russia.  
Email: ivakhnenko2002@mail.ru. ORCID 0000-0002-9798-993X

**Olesya V. Anikeeva** – PhD (Eng.), Associate Professor, Quality Management Specialist, Federal State-Owned Enterprise Kursk Biofactory – Company BИOK, Kursk, Russia.  
Email: olesya-anikeeva@yandex.ru. ORCID 0000-0001-7907-451X

**Oksana V. Islamova** – PhD (Eng.), Associate Professor, Berbekov Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, Russia.  
Email: islamova\_81@mail.ru.

**Anna I. Razumova** – postgraduate student, Southwest State University, Kursk, Russia.  
Email: belkarazym@mail.ru.

**Kirill A. Gulyaev** – postgraduate student, Southwest State University, Kursk, Russia.  
Email: gulyaev1997@mail.ru.

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)  
УДК 657.6; 519.866  
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-3-140-151



## ВЛИЯНИЕ АВТОРИТАРНОСТИ И ДОВЕРИЯ НА СТРУКТУРУ КОНСЕНСУСНОГО РЕШЕНИЯ

Максимова О.В.

Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля, Москва, Россия  
Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия

**Аннотация.** Сложность формализации переговорного процесса приводит к поиску теоретических моделей с целью получения обобщенных выводов. Теоретическое изучение консенсуса позволяет анализировать различные ситуации, с которыми сталкиваются группы, участвующие в процессе принятия коллективных решений, абстрагируясь от ее специфических характеристик. В работе рассматривается математическая модель консенсуса, основанная на регулярных цепях Маркова. Построены теоретические факторы, воздействующие на качество консенсусного решения, и нашедшие отражение в социально-психологических исследованиях. По результатам моделирования составлены нелинейные регрессионные модели, отражающие вклад численности группы и авторитарности ее членов в структуру консенсусного решения. Показано, что не всегда мнение самого авторитарного (или того, кому больше всех доверяют) перевешивает мнения остальных членов группы в итоговом решении. Построенные уравнения позволяют предсказать вероятность максимального учета мнения самого авторитарного (или человеку с максимальным групповым доверием) в итоговом решении лишь по размаху авторитарностей членов группы фиксированного размера. Показано, что в случаях высокого группового доверия в однородной группе к отдельному члену, так же как и в случае наличия члена с высокой авторитарностью, итоговое решение будет с перевесом мнения этого члена группы. Это, в свою очередь, может привести к консенсусу, далекому от мудрого решения в случае, если этот член группы не эксперт в рассматриваемом вопросе. Высокое доверие и авторитарность служат блокирующими факторами в принятии равновесного итогового решения. Обнаружено, что в больших группах, в отличие от малых, в условиях отсутствия однородности и наличия высоко авторитарных членов роль рассматриваемых факторов ослабевает, консенсусное решение близко к равновесному. Рассчитаны точки равновесия, когда авторитарность и высокое доверие группы перестают быть определяющими при формировании веса мнения в итоговом решении. Полученные теоретические результаты выявления факторов, влияющих на перевес мнения в консенсусном решении, позволят не допустить ситуаций, когда возможно использовать процесс классического консенсуса для манипулирования качеством принимаемого решения.

**Ключевые слова:** консенсус, консенсусное решение, моделирование, марковские цепи, авторитарность, групповое доверие

© Максимова О.В., 2024

### Для цитирования

Максимова О.В. Влияние авторитарности и доверия на структуру консенсусного решения // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №3. С. 140-151. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-140-151>



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

# INFLUENCE OF AUTHORITARIANISM AND TRUST ON THE STRUCTURE OF A CONSENSUS DECISION

Maksimova O.V.

Izrael Institute of Global Climate and Ecology, Moscow, Russia  
University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia

**Abstract.** The difficulty of formalizing the negotiation process leads to the search for theoretical models to draw generalized conclusions. The theoretical study on consensus provides for analyzing various situations faced by groups involved in the collective decision making process, abstracting from its specific characteristics. The paper considers a mathematical model of consensus based on regular Markov chains. It includes the determined theoretical factors influencing the quality of a consensus decision and reflected in social and psychological studies. Non-linear regression models reflecting the contribution of the group size and authoritarianism of its members to the structure of a consensus decision are compiled based on the results of modeling. It has been shown that not always the opinion of the most authoritarian person (or the one who is most trusted) outweighs the opinions of the other group members in the final decision. The equations are worked out to predict the probability of maximum consideration of the opinion of the most authoritarian group member (or the member with the highest trust of the group) in the final decision only by the authoritarian's range of the members of the group of the fixed size. It has been shown that in cases of high group trust in a homogeneous group to an individual member, as well as in case of a member with high authoritarianism, the final decision will be with a preponderance of the opinion of this group member. This, in turn, can lead to a consensus far from being a wise solution, if that group member is not an expert on the issue under consideration. High trust and authoritarianism serve as blocking factors in making an equilibrium final decision. It has been found that in large groups, unlike small groups, in conditions of lack of homogeneity and presence of highly authoritarian members, the role of these factors is weakened and the consensus decision is close to an equilibrium one. Equilibrium points are calculated to show where authoritarianism and high trust are no longer decisive in shaping weight of the opinion in the final decision. The obtained theoretical results of revealing the factors influencing the preponderance of an opinion in the consensus decision will prevent situations when it is possible to use the classical consensus process to manipulate the outcome of decision making.

**Keywords:** consensus, consensus decision, modeling, Markov chains, authoritarianism, group trust

## For citation

Maksimova O.V. Influence of Authoritarianism and Trust on the Structure of a Consensus Decision. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 3, pp. 140-151. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-140-151>

## Введение

Одним из условий для успешной групповой работы является обеспечение консенсуса между членами группы относительно принимаемого решения. Принятие решений на основе консенсуса является альтернативой распространенным процессам принятия групповых решений на основе голосования. Успешный процесс принятия решений путем консенсуса основан на доверии и заинтересованности между вовлеченными людьми, объединенными общей целью и желающими сотрудничать для ее достижения. В результате совместной деятельности в группе можно достичь результатов, которых ценой невероятных усилий никогда бы не смог достичь каждый человек в одиночку [1]. Активная позиция каждого члена группы в принятии итогового решения позволяет достичь результата, который принимают все. Как отмечается в работе [2], опыт консенсусного взаимодействия открывает дверь в другой образ жизни и другой вид устройства общества.

Вопросы достижения консенсуса, в основе которого лежит, как правило, возможность и способность его членов к компромиссу, в настоящее время исследованы мало, что связано со сложностью формализации самой процедуры переговорного процесса. В такой ситуации на помощь приходят математические модели, которые могут дать ответы при более общих допущениях и уйти от множества частных случаев [3, 4]. Также теоретическое изучение феномена консенсуса позволяет выявлять факторы, управление которыми позволяет не допускать ситуаций манипулирования как самим процессом, так и результатами принимаемых решений.

Впервые возможность описания модели консенсуса на основе регулярных цепей Маркова была продемонстрирована профессором кафедры статистики ДеГроотом в 1974 году [5]. В цикле работ за последние годы эта модель прошла как успешную верификацию, так и реализацию разных подходов к ее анализу [4, 6-9]. Модель построена на предположении, что участники обмениваются мнениями и могут учи-

тивать опыт и суждения остальных членов группы для пересмотра своих субъективных мнений в процессе дискуссии. Основными преимуществами такой модели является возможность выделять и изучать ключевые характеристики группы и формировать практические рекомендации для недопущения затягивания процесса принятия согласованного решения. При этом ранее выявлено, что сам процесс достижения консенсуса и его результат связаны с двумя основными характеристиками: временем до достижения результирующего (консенсусного) решения и структурой полученного решения (то есть учета мнения каждого участника переговоров). Например, в работе [8] показано, что влияние наиболее весомого члена группы исчезает по мере роста ее численности. А в работе [9] отмечается, что разные веса начальных мнений позволяют определить вклады членов группы в общую позицию.

В других исследованиях анализ модели ДеГроота часто был посвящен вопросам исследования времени достижения консенсуса и определению факторов, влияющих на это время [4-8]. С помощью разных подходов к анализу модели ДеГроота выявлено, что рост численности группы и высокая авторитарность ее членов, как правило, сильно затягивают процесс достижения консенсуса и в некоторых частных случаях блокируют его, наряду и с существованием в группе структуры (к примеру, коалиции), которая если даже малочисленна, сохраняет большую часть своего мнения внутри [7, 8]. Ясно, что иногда имеет смысл пожертвовать временем для принятия хорошего решения, чем тратить время на пересмотр плохого. Однако контролирование этих факторов не решает проблему истинности и структуры принятого решения [4, 10]. Поэтому применение методов достижения консенсуса обсуждается как в научной, так и в учебной литературе, включая работы, направленные на манипулирование общественным мнением [2, 11, 12]. Структура же консенсусного решения при этом в явном виде не изучалась, за исключением частных случаев модели. Отметим, что время достижения консенсуса и структура принятого в результате решения – независимые характеристики, то есть длительность самого процесса не оказывает влияние на структуру итогового решения [7, 8].

В последние десятилетия внимание к обеспечению консенсуса в различных группах привело к ее широкой применимости в разных приложениях. Часто, к примеру, модели переговоров приводят исследователя к инструментарию теории игр, поскольку участники переговоров преследуют свои собственные (часто антагонистические) цели [13]. Отмечено, что предложенный подход с использованием арбитражных схем и репутаций участников может применяться при изучении роли репутации в теоретико-игровых моделях переговоров, которые активно используются в экономике. Однако рассматриваемая в исследовании модель ближе к социальным сетям, где участни-

ки, как правило, объединены общими интересами [13]. Но в отличие от социальной группы, на их поведение оказывает влияние как общественное мнение и действия социального окружения, так и поведение некоторых агентов, так как социальная сеть дает возможность к внешней и массовой коммуникации. Социальная группа – более устойчивая структура, сфокусированная на решении конкретной задачи с выстраиванием доверительных отношений в ходе обсуждений. Проблема влияния доверительных отношений становится значимой в социальном взаимодействии на разных уровнях переговоров в группе [14-17]. К примеру, в некоторых исследованиях уровень межличностного доверия рассматривается с помощью построения индекса близости (несогласия) исходных предпочтений, однако не уточняется, как этот показатель может быть измерен на практике [16, 17]. В частности, в этих исследованиях получено, что команды с более высоким показателем индекса общей ментальной близости будут иметь более высокий уровень консенсуса. В большинстве таких социологических исследований сам процесс переговоров хорошо изучен только в малых группах [15, 18].

Вопросы обеспечения консенсуса рассматриваются и в различных социально-психологических исследованиях, связанных с групповой динамикой [19]. Среди факторов, положительно влияющих на групповую эффективность и не позволяющих допускать манипулирования переговорного процесса, исследователи выделяют высокую компетентность в социальном взаимодействии, умение отстаивать свою точку зрения и прислушиваться к мнению всех членов группы, личную мотивацию и доброжелательность. К характеристикам, негативно влияющим на работу в группе, относятся отсутствие гибкости, желание доминировать, неспособность пересмотреть свою точку зрения и агрессивность [20]. Основные преимущества этих исследований в том, что разработанные показатели и рекомендации позволяют модератору повышать уровень группового консенсуса на различных этапах процесса. Отмечается, что разработанные показатели не дают полную информацию о разногласиях или консенсусе группы. Такого типа исследования посвящены технологиям ведения переговоров, формированию правил и механизмов разрешения конкретных конфликтов, а также системной деятельности государственных институтов и общественно-политических организаций по обеспечению общественного согласия.

В последние десятилетия возник целый пласт исследований, посвященный разработке алгоритмов, обеспечивающих командную работу мультиагентных систем [21]. Актуальность этих исследований диктуется потребностью к быстрому принятию управленческих решений ввиду увеличения темпов деятельности многих организаций и выработке нестандартных решений, которые, очевидно, не служат результатом озарения одного из членов группы, а результатом

выработки новых идей под руководством модератора [9, 22]. Также с 1960-х годов известен метод достижения консенсуса Делфи, в котором особое внимание уделяется исходным характеристикам группы. Метод имеет четыре существенные особенности: анонимность, итеративность, контролируемая обратная связь с суждениями участников и статистическое агрегирование ответов членов группы [23, 24]. Этот метод широко используется для бизнес-прогнозирования во многих областях, связанных со здравоохранением (например, во время пандемии COVID-19), включая клиническую медицину, общественное здравоохранение, он помогает разрабатывать профессиональные рекомендации [25]. Несмотря на ряд преимуществ этого метода (например, что прогнозы (или решения), полученные от структурированной группы людей, более точны, чем прогнозы, полученные от неструктурированных групп), основным недостатком служит возможность игнорирования точек зрения в группе и высокие полномочия модератора [24].

Возвращаясь к модели ДеГроота, которая интуитивно понятно описывает процесс переговоров в социальной группе, важно отметить следующие преимущества: в модели представлены достаточно простые условия, как индивид получает новую информацию в каждом раунде переговоров; модель позволяет выявить веса учета мнения, что дает возможность получить обобщенные выводы, абстрагируясь от многих особенностей группы, и сформировать практические рекомендации, позволяющие не затягивать процесс принятия согласованного решения. Полученное в результате решение характеризуется тем, что в ходе переговоров опирается на позицию каждого члена, но в какой мере? Важным представляется то, каким будет итоговый вектор мнений, а именно мнение какого переговорщика будет учитываться в итоговом решении максимально, чему посвящено настоящее исследование.

*Цель работы* – определить и проанализировать факторы, влияющие на равновесность (качество) структуры консенсусного решения в больших и малых группах, с применением модели консенсуса, основанного на регулярных цепях Маркова.

### Материалы и методы исследования

Во введении отмечено, что математическая модель консенсуса, впервые предложенная ДеГроотом, основана на регулярных цепях Маркова. Модель описывает, как группа может прийти к соглашению об общем начальном субъективном распределении по некоторому вопросу путем проведения раундов переговоров [5, 6]. Опишем коротко эту теоретическую модель. Пусть обсуждается некоторый вопрос относительно параметра  $\Theta$  (не обязательно вещественного) в группе из  $n$  человек. Предполагается, что значение самого параметра  $\Theta$  неизвестно/не полностью известно. Каждый из переговорщиков придерживается своего первоначального мнения относительно  $\Theta$ , который задается начальным вектором

$$S(0) = (S_{01}, S_{02}, \dots, S_{0n}),$$

где  $S_{0l}$  – мнение  $l$ -го переговорщика,  $l = 1, \dots, n$ . Для каждого  $l$  будем полагать, что  $S_{0l}$  взяты из распределения, которое индивид  $l$  присваивает параметру  $\Theta$ . Также будем полагать, что  $(S_{01}, S_{02}, \dots, S_{0n})$  – случайный вектор, для компонент которого можно указать вероятности.

Члены группы обмениваются мнениями в ходе каждого раунда переговоров. Каждый из участников осведомлен о первоначальном распределении мнений других участников, поэтому для него вполне естественно пересмотреть свое субъективное мнение, чтобы учесть информацию, опыт и суждения остальных членов группы. Поэтому он может как изменить свое мнение, так и оставить прежним в любом раунде. В математической модели этот процесс отражают вероятности доверия  $p_{ij}$   $i$ -го члена группы к мнению  $j$ -го как  $0 < p_{ij} < 1$  ( $i = 1, \dots, n$ ;  $j = 1, \dots, n$ ). В случае  $i = j$  получим вероятность  $p_{ii}$ , которую можно интерпретировать как уровень авторитарности<sup>1</sup>  $i$ -го члена группы относительно решаемого вопроса: чем выше  $p_{ii}$ , тем выше его авторитарность. Формируется матрица доверия  $P = (p_{ij})$ , которая априори является стохастической ( $\forall i \in \overline{1, n} \left[ \sum_{j=1}^n p_{ij} = 1 \right]$ ).

Когда  $l$ -й член группы, к примеру, в первом раунде переговоров пересматривает свое мнение, то его новое мнение есть линейная комбинация мнений остальных членов группы:

$$S_{1l} = \sum_{j=1}^n p_{lj} \cdot S_{0j} = (p_{l1}, p_{l2}, \dots, p_{ln}) \cdot S^T(0).$$

Таким образом, после первого раунда переговоров получаем новый вектор мнений:

$$S^T(1) = P \cdot S^T(0) = (S_{11}, S_{12}, \dots, S_{1n})^T.$$

Аналогично можно показать, что после второго раунда переговоров формируется вектор мнений

$$S^T(2) = P \cdot S^T(1).$$

Проведя такое преобразование для каждой компоненты вектора, после двух раундов получаем

$$S^T(2) = P \cdot S^T(1) = P \cdot P \cdot S^T(0) = P^2 \cdot S^T(0) = (S_{21}, S_{22}, \dots, S_{2n})^T.$$

После  $k$  раундов переговоров приходим к формуле

$$S^T(k) = (S_{k1}, S_{k2}, \dots, S_{kn})^T = P \cdot S^T(k-1) = P^k \cdot S^T(0). \quad (1)$$

<sup>1</sup> Авторитарность [от лат. *autoritas* – влияние, власть] – социально-психологическая характеристика личности, отражающая ее стремление максимально подчинить своему влиянию партнеров по взаимодействию и общению.

Очевидно, что мнение после  $k$  раундов зависит от распределения вероятностей в матрице  $P^k$ . Если консенсус действительно достигнут, то все компоненты итогового вектора распределения субъективных мнений сходятся друг к другу, то есть  $\lim_{k \rightarrow \infty} S_{ik} = S^*$ . Значит, из уравнения (1) в случае достижения консенсуса существует предельное распределение вероятностей матрицы доверия  $P^* = (p_1^*, p_2^*, \dots, p_n^*)$  такое, что

$$S^* = \sum_{j=1}^n p_j^* \cdot S_{0j}. \quad (2)$$

**Теорема** [26]. Если цепь Маркова регулярна<sup>2</sup>, то существуют предельные вероятности  $p_j^*$ , которые не зависят от начального состояния системы  $S(0)$ .

Для регулярности матрицы достаточно, чтобы суммы по строкам матрицы  $P$  были равны единице и существовали  $i, j$ , для которых выполнено строгое неравенство  $0 < p_{ij} < 1$ , что обусловлено в текущем исследовании выдвигаемыми начальными предположениями. Таким образом, если матрица доверия  $P$  регулярна, то вне зависимости от начальных мнений переговорщиков, консенсус достигим.

Из последней формулы (2) становится ясно, что предельные вероятности  $p_j^*$  будут задавать вес  $j$ -го переговорщика в итоговом решении.

### Полученные результаты и их обсуждение

**1. Выявление факторов, подлежащих рассмотрению в модели.** Проведем оценку компонент итогового предельного вектора вероятностей  $P^* = (p_1^*, p_2^*, \dots, p_n^*)$ . Для этого используем утверждения по свойствам Марковских цепей.

**Утверждение 1.** Для стохастической матрицы  $P$  миноры диагональных элементов матрицы  $I - P$  положительны.

**Утверждение 2.** Если стохастическая матрица  $P$  регулярна, то существуют предельные вероятности состояний  $p_i^*$ , значения которых можно рассчитать через миноры диагональных элементов матрицы  $I - P$ :

$$p_i^* = \frac{(I - P)_{ii}}{\sum_{l=1}^n (I - P)_{ll}}, \quad (3)$$

где  $(I - P)_{ii}$  – минор диагонального элемента с номером  $ii$ .

Матрица  $I - P$  известна в литературе как лапласовская матрица и достаточно подробно изучена [21]. В частности, с алгебраическими свойствами лапласовских матриц связаны теоремы об асимптотике консенсуса и структуре предельного вектора, поэтому

<sup>2</sup> Если при некотором  $n$  все элементы стохастической матрицы  $P^n$  не равны нулю, то такая матрица переходов называется регулярной.

она играет ключевую роль в анализе мультиагентных систем. Проведем анализ компонент предельного вектора с точки зрения интерпретации введенных характеристик: авторитарность и групповое доверие.

Ясно, что максимальное значение компоненты  $p_i^*$  предельного вектора вероятностей будет соответствовать тому значению  $i$ , для которого вклад диагонального минора максимален в сумме остальных. Но так как необходимо провести анализ с позиции авторитарности и доверия членов группы, то проанализируем значения миноров элементов  $(I - P)_{ii}$ .

а) Рассмотрим стохастическую матрицу  $P$  размерности  $2 \times 2$ :

$$P = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{11} & 1 - p_{11} \\ 1 - p_{22} & p_{22} \end{pmatrix}.$$

Тогда матрицы  $I - P$  будут иметь вид

$$I - P = \begin{pmatrix} 1 - p_{11} & -p_{12} \\ -p_{21} & 1 - p_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{12} & -p_{12} \\ -p_{21} & p_{21} \end{pmatrix}.$$

Миноры диагональных элементов  $(I - P)_{11} = p_{21}$ ,  $(I - P)_{22} = p_{12}$ . Согласно формуле (3) наибольшее значение предельной компоненты вектора  $P^* = (p_1^*, p_2^*)$  будет:  $p_1^*$ , если наибольшим будет  $p_{21}$ , и  $p_2^*$ , если наибольшим будет  $p_{12}$ .

**Интерпретация результата.** Наибольший вес мнения в итоговом решении будет у того переговорщика, кому оказывается большее доверие или, что то же самое в условиях матрицы доверия  $P$  размерности  $2 \times 2$ , у кого наибольшая авторитарность.

б) Рассмотрим стохастическую матрицу  $P$  размерности  $3 \times 3$ :

$$P = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} \end{pmatrix}.$$

Тогда матрицы  $I - P$  будут иметь вид

$$I - P = \begin{pmatrix} 1 - p_{11} & -p_{12} & -p_{13} \\ -p_{21} & 1 - p_{22} & -p_{23} \\ -p_{31} & -p_{32} & 1 - p_{33} \end{pmatrix}.$$

Миноры диагональных элементов  $(I - P)_{11} = (1 - p_{22})(1 - p_{33}) - p_{23}p_{32}$ ,  $(I - P)_{22} = (1 - p_{11})(1 - p_{33}) - p_{13}p_{31}$ ,  $(I - P)_{33} = (1 - p_{11})(1 - p_{22}) - p_{12}p_{21}$ . Очевидно, что по полученным уравнениям нельзя однозначно определить, какая из компонент предельного вектора  $P^* = (p_1^*, p_2^*, p_3^*)$  будет наибольшей. Поэтому в условиях матрицы доверия  $P$  размерности  $3 \times 3$  связь с доверием и авторитарностью становится не такой прямой и очевидной, как в случае размерности  $2 \times 2$ . Это демонстрирует следующий пример.

Пусть имеется две матрицы доверия:



$$P_1 = \begin{pmatrix} 0,1 & 0,6 & 0,3 \\ 0,5 & 0,4 & 0,1 \\ 0,1 & 0,1 & 0,8 \end{pmatrix} \text{ и } P_2 = \begin{pmatrix} 0,2 & 0,7 & 0,1 \\ 0,5 & 0,2 & 0,3 \\ 0,3 & 0,2 & 0,5 \end{pmatrix}.$$

По формуле (3) несложно рассчитать компоненты предельного вектора: для  $P_1$  получим предельный вектор  $p^* = (0,22, 0,30, 0,48)$  и для  $P_2$  – вектор  $p^* = (0,34, 0,37, 0,29)$ . В первом случае наибольший вес в итоговом решении будет у третьего члена с наибольшей авторитарностью, но меньшим доверием двух других членов группы, а во втором случае наибольший вес будет у второго с наибольшим доверием двух других членов группы, но не максимальной авторитарностью.

*Интерпретация результата.* Наибольший вес мнения в итоговом решении можно ожидать у того переговорщика, которому будет максимальное доверие двух других членов группы и при этом он будет наиболее авторитарен.

На основании двух рассмотренных случаев выдвигаются предположения, что наибольший вес мнения в итоговом решении может соответствовать переговорщику:

- которому оказывается со стороны группы наибольшее доверие;
- который наиболее авторитарен.

Доверие в психологических исследованиях рассматривается через принципы обмена и выгоды, что определяет его как результат обмена между двумя членами группы [27]. Опросник для изучения доверия и недоверия личности к другим людям, выраженных в процентах, разработан, например, в работе Купрейченко и апробирован на выборке более 2700 человек [28]. Подавляющее большинство работ в психологии сконцентрировано на исследовании влияния доверия в диадах, тогда как менее изученными являются вопросы влияния доверия как в контексте малой, так и большой группы. В таких работах получены весьма противоречивые результаты: в одних работах было обнаружено прямое действие доверия, в других выявлено его косвенное влияние или вообще его отсутствие [29]. Более того, многими исследователями диада не признается как малая группа, так как в диаде не проявляются некоторые особенности, связанные с доверием, в отличие от групп [30]. Поэтому закономерности, возникающие в диаде (в том числе по доверию), не могут быть однозначно экстраполированы на более многочисленное сообщество.

Авторитарность членов группы рассматривается как одна из интегральных характеристик, которая также может быть измерена с помощью предварительных тестов [31]. В этих тестах формируется показатель, измеряемый в процентах, который легко переводится в интервал (0, 1), что и используется в данном исследовании.

Для получения обобщенных результатов в группах произвольного размера прибегнем к моделированию. Будем придерживаться следующей терминологии:

- группу будем называть *однородной*, если авторитарности ее членов равны;
- под *доверием группы i-му члену* будем понимать суммарные вероятности доверия остальных членов,

то есть  $\sum_{j=1, j \neq i}^n P_{ij}$ .

**2. Моделирование.** Сформулируем основные этапы моделирования.

1) *Независимые переменные* (факторы):

- число  $n$  человек в группе (рассмотрим малые группы с численностью  $n = 3, 4, 5$  и большие группы  $n = 10, 20, 50$ );

- размах авторитарностей членов группы  $q$  (рассмотрим значения  $q = 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9$ ).

2) *Зависимые переменные*:

- вероятность  $p$ , что наибольший вес мнения соответствует переговорщику с наибольшей авторитарностью;

- вероятность  $p_1$ , что наибольший вес мнения соответствует переговорщику с наибольшим суммарным доверием  $\sum_{i=1, j \neq i}^n P_{ij}$  остальных членов группы.

Замечания к пунктам 1-2:

- Рассмотрение всех размеров малых групп ( $n = 3, 4, 5$ ) связано с тем, что результаты для малых групп могут отличаться от результатов для больших. В частности, в ранее проведенных исследованиях времени до достижения консенсуса выявлены принципиальные различия [4, 7].

- Предварительно проведенное моделирование для групп с равноавторитарными членами позволило установить, что при фиксированной численности группы изменение авторитарности статистически незначимо влияет на вероятность  $p_1$ , в отличие от ситуации, когда авторитарности разные. Поэтому в качестве второго фактора в исследовании выбран размах авторитарностей членов группы  $q$ .

3) *Моделирование матрицы P.*

Первоначально моделировались вероятности  $p_{ij}^0$  ( $i \neq j$ ) из равномерного закона распределения  $R(0, 1)$ . Выборка из равномерного закона распределения накладывает некоторые реальные ограничения на структуру матрицы доверия, но взамен дает понятную характеристику весов влияния, а также препятствует возникновению частных структур с присутствием жестких предпочтений среди остальных членов группы.

Далее с целью достижения условия стохастичности матрицы  $P$  путем нормировки промоделированных вероятностей  $p_{ij}^0$  производился расчет вероятности доверия  $p_{ij}$  для каждого элемента  $i$ -й строки:

$$p_{ij} = \frac{p_{ij}^0}{\sum_{j=1, i \neq j}^n p_{ij}^0} \cdot (1 - p_{ii}) \text{ при } i \neq j.$$

Таким образом, вероятности  $p_{ij}$  задают выборку из равномерного закона. Получаемая в результате моделирования матрица  $P$  – стохастическая:

$$\sum_{j=1}^n p_{ij} = p_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{p_{ij}^0}{\sum_{j=1, i \neq j}^n p_{ij}^0} \cdot (1 - p_{ii}) =$$

$$= p_{ii} + (1 - p_{ii}) \cdot \frac{\sum_{j=1, i \neq j}^n p_{ij}^0}{\sum_{j=1, i \neq j}^n p_{ij}^0} = p_{ii} + (1 - p_{ii}) = 1.$$

Для получения устойчивых выводов для каждой комбинации факторов реализовывалось 100 итераций в среде *Excel* [32]. Таким образом, имелось 30 серий по 100 моделирований в каждой. Для каждого эксперимента серии производился расчет предельного вектора вероятностей  $(p_1^*, p_2^*, \dots, p_n^*)$  и находился номер его максимальной компоненты. Далее вводился счетчик по следующему правилу:

- если этот номер совпадал с номером самого авторитарного участника, то значению первого значения эксперимента присваивалась 1 для последующего расчета  $p$ ;

- если этот номер совпадал с номером участника с максимальным доверием, то значению второго значения эксперимента присваивалась 1 для последующего расчета  $p_1$ .

По результатам экспериментов производился расчет статистической оценки переменных  $p$  и  $p_1$ . Дополнительно для сравнения с результатами предварительного моделирования проводились 6 контрольных серий по 100 моделирований в условиях равной авторитарности всех членов ( $q = 0$ ).

Расчеты и графическая интерпретация проводились с использованием статистического пакета *Statistica* 15.

**3. Результаты.** Оценим вероятности  $p$  и  $p_1$  для каждой комбинации факторов. Анализ графиков зависимости  $p$  и  $p_1$  от каждого из факторов показал, что наилучшими регрессионными моделями будут степенные. Из всех пробных моделей наилучшими трехмерными регрессионными моделями оказались

$$p = A \cdot n^\alpha \cdot q^\beta \text{ и } p_1 = A_1 \cdot n^{\alpha_1} \cdot q^{\beta_1}.$$

Данный вид зависимости широко применяется в экономических исследованиях и носит название функции полезности, или функции Кобба-Дугласа<sup>3</sup>.

Путем предварительного логарифмирования были найдены регрессионные коэффициенты соответствующих линейных моделей и оценено их качество (для  $\ln(p)$  коэффициент детерминации модели

$R^2 \approx 0,881$  и для  $\ln(p_1)$  коэффициент  $R^2 \approx 0,898$ ). Результирующие модели имеют вид

$$p = \min\{1, 34 \cdot n^{-0,14} \cdot q^{0,40}, 1\}, \quad (4)$$

$$p_1 = \min\{1 \cdot n^{-0,67} \cdot q^{-0,42}, 1\}, \quad (5)$$

где  $n$  – число человек в группе;  $q$  – размах авторитарностей членов группы;  $p$  – оценка вероятности, что наибольший вес мнения соответствует переговорщику с наибольшей авторитарностью;  $p_1$  – оценка вероятности, что наибольший вес мнения соответствует переговорщику с наибольшим суммарным доверием.

Расчет коэффициентов детерминации для итоговых моделей (4) и (5) по экспериментальным данным дал результаты:  $R^2 \approx 0,910$  и  $R^2 \approx 1$  соответственно. Контрольная серия экспериментов для параметра  $q = 0$  показала согласующиеся с моделями (4) и (5) результаты (рис. 1, 2):  $p_1 \geq 0,87$ , а для модели (4) параметр  $q = 0$  соответствует случаю, когда авторитарности всех членов равны и, следовательно, значение  $p$  не имеет смысла. Общие полученные выводы по моделям следующие:

- так как сумма показателей  $\alpha + \beta$  в (4) больше нуля, то функция отражает положительную отдачу от роста обоих факторов одновременно;

- так как сумма показателей  $\alpha_1 + \beta_1$  в (5) меньше  $-1$ , то функция отражает не просто отрицательную отдачу от роста обоих факторов одновременно, но еще и в большей пропорции относительно суммарного роста факторов;

- прирост на 1% значения фактора  $q$  задает средний прирост на 0,40% значения  $p$  и уменьшение на 0,42% значения  $p_1$  при фиксированном  $n$ ;

- прирост на 1% значения фактора  $n$  задает среднее уменьшение на 0,14% значения  $p$  и на 0,67% значения  $p_1$  при фиксированном  $q$ .

На **рис. 1** представлены трехмерные графики моделей (4) и (5), а на **рис. 2** их экспериментальные двумерные реплики при фиксированном значении  $n$ . Приходим к оптимальности по Парето<sup>4</sup>: точка оптимальности  $q^*$  лежит в пределах от 0,1 до 0,4 в экспериментальной области в зависимости от  $n$ . Отметим, что при  $n = 2$  пересечение графиков рассматриваемых моделей (4) и (5) дает значение  $q^* = 0,5$ . Визуализация на **рис. 2** показывает, что для фиксированного  $n$ :

- при  $q > q^*$  увеличивается показатель  $p$  и уменьшается показатель  $p_1$ ;

- при  $q < q^*$  увеличивается показатель  $p_1$  и уменьшается показатель  $p$ .

<sup>3</sup> Впервые верифицирована на статистических производственных данных Чарльзом Коббом и Полом Дугласом в 1928 г.

<sup>4</sup> Оптимальность по Парето — термин из теории игр, описывающий такое состояние системы, при котором ни один показатель системы не может быть улучшен без ухудшения какого-либо другого показателя.

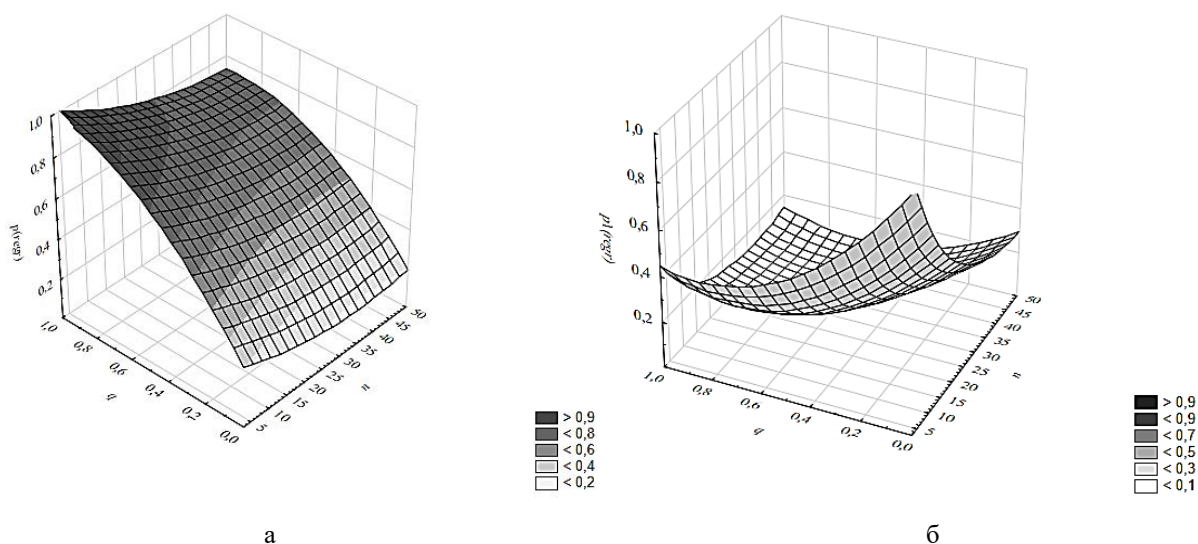


Рис. 1. Трехмерная визуализация моделей: а – модель (4); б – модель (5)  
 Fig. 1. 3D visualization of models; а is model (4); б is model (5)

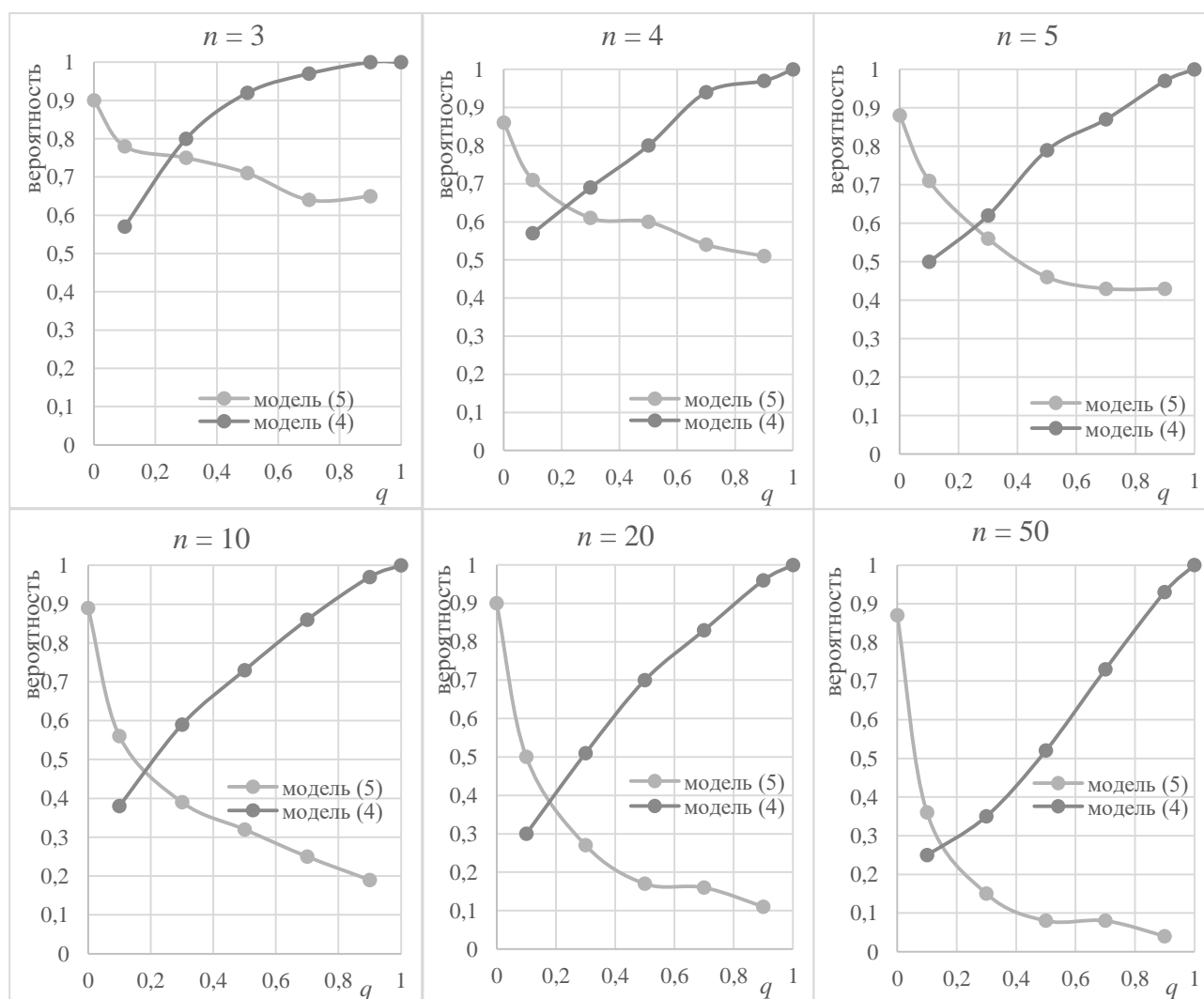


Рис. 2. Графики экспериментальных данных для моделей (4) и (5) при фиксированном  $n$   
 Fig. 2. Experimental data curves for models (4) and (5) at fixed  $n$

**4. Интерпретация результатов.** Использование процедуры консенсуса при решении разного рода задач дает возможность быть услышанными малым и большим группам, авторитарным и лояльным переговорщикам. В ходе переговоров достигаемое итоговое решение опирается на позицию каждого члена, но в какой мере? Полученные результаты показали, что авторитарность переговорщика и оказываемое ему доверие со стороны других членов группы служат важными факторами в формировании консенсусного решения. Каждый из этих факторов отдельно не является достаточным для того, чтобы мнение соответствующего члена группы имело максимальный вес в итоговом решении. Опишем основные результаты интерпретации моделей (4) и (5) и их графической реализации на рис. 1 и 2.

1) Чем менее однородна группа (при фиксированном ее размере  $n$ ), тем:

- больше вероятность, что вес мнения наиболее авторитарного члена в итоговом решении будет максимальным;

- меньше вероятность, что вес мнения члена группы с максимальным доверием группы будет максимальным.

Это говорит о том, что чем менее однородна группа, тем большую значимость обретает авторитарность ее отдельных членов в формировании итогового решения в отличие от группового доверия. То есть чем больше расхождение в авторитарностях членов группы, тем вероятнее появление авторитарного члена и учет его мнения в большей степени. В частности, в предельном случае при  $q = 1$  в группе есть абсолютно неавторитарный и абсолютно авторитарный участники, что приводит к тому, что итоговое решение опирается только на позицию последнего. Полученный результат согласуется с ранее исследованными частными случаями наличия абсолютно авторитарного участника, которому оказывается доверие [8, 33]. Таким образом, высокий уровень авторитарности служит блокирующим фактором для принятия решения в группе с равным учетом мнения каждого переговорщика (равновесного). И, наоборот, чем более однородна группа, тем большее значение обретает фактор доверия для неравновесности итогового решения.

2) В однородной группе высокую значимость на формирование итогового решения оказывает групповое доверие: с вероятностью не менее 0,87 вес мнения в итоговом решении больше у того, кому больше доверяет группа. Итоговое решение будет опираться с большим перевесом на позицию такого члена группы. Это, в свою очередь, может привести к консенсусу, далекому от мудрого решения, если этот член группы не эксперт в рассматриваемом вопросе [8, 10]. И, наоборот, если присутствует эксперт с особым мнением, но нет группового доверия, это будет способствовать тому, что его мнение не будет услышано и, соответственно, не учтено в итоговом решении.

3) Максимальный вес мнения в итоговом решении с ростом численности переговорщиков (при фиксированном размахе авторитарностей членов группы  $q$ ) меньше зависит от:

- авторитарности в более однородной группе;
- группового доверия каждому члену группы в менее однородной группе.

В малых группах доверие играет более значимую роль при формировании итогового решения, чем в больших, и способствует проявлению лидерства, что согласуется с результатами социологических исследований в малых группах [29]. Потому, как отмечается в социологических исследованиях, для выполнения оперативных задач наиболее эффективны небольшие группы, а для комплексных сложных задач – большие [1]. В больших группах, наоборот, при отсутствии проявления однородности и высокой авторитарности членов рассматриваемые факторы мало сказываются на весе мнения отдельного индивида в итоговом решении. Это обусловлено тем, что при отсутствии абсолютно авторитарных членов в неоднородной группе значения предельных вероятностей в большой группе (с учетом того, что их сумма равна 1) становятся близкими по отношению друг к другу, и итоговое решение получается близко к равновесному. Похожий результат, как отмечалось во введении, получен другими авторами без применения моделирования [8].

4) Точка равновесия в моделях, когда авторитарность и доверие конкретного члена группы перестают играть определяющую роль в формировании веса в итоговом решении, зависит от размера группы. Чем больше размер группы, тем эта точка ближе к ситуации однородности группы, и рассматриваемые факторы менее значимы для выявления максимального веса мнения этого члена группы. Можно сделать вывод, что большие группы часто функционируют как единое целое. Как отмечают психологи, размер группы является важной детерминантой группового поведения [1].

5) Модель демонстрирует высокую вероятность максимального учета мнения в проявлении суммарного воздействия двух факторов: авторитарность участника с высоким доверием к нему группы. Это говорит об еще одном аспекте лидерства. С одной стороны, как выявлено в работе [34], наличие лидерства в группе приводит часто к быстрому консенсусу, но, с другой стороны, как выявило текущее исследование, консенсусное решение будет обуславливаться максимальным учетом мнения соответствующего лидера. Таким образом, в группе с полярными мнениями по рассматриваемому вопросу перевес будет в сторону мнения авторитарного.

*Недостатки построенных моделей.* Модели не дают ответ о роли доверия и авторитарности в случае нарушения регулярности матрицы доверия  $P$ , что приводит к необходимости учета частных случаев, некоторые из которых рассмотрены, к примеру, в работах [6]. Также модели выявляют, что рассмотренные факторы не являются единственно возможными, которые способны оказывать влияние на вес мнения переговорщиков в итоговом решении. Выявленные слабые стороны модели дают возможность дальнейшего продолжения исследования.

### Заключение

В работе рассматривается теоретическая модель консенсуса ДеГроота, основанная на регулярных цепях Маркова. На основе модели выявлены факторы, воздействующие на структуру консенсусного решения. Эти факторы нашли отражение в социально-психологических исследованиях, проводимых в некоторых малочисленных группах.

Построены регрессионные модели, отражающие вклад численности группы и авторитарности членов в структуру консенсусного решения. Полученные уравнения позволяют предсказать вероятность максимального учета мнения самого авторитарного члена группы (члена группы с наибольшим доверием остальных) лишь по размаху авторитарностей без знаний самих авторитарностей членов группы, что может быть важным на практике в условиях неопределенности. Выявлено, что в общем случае авторитарность членов и групповое доверие не дают линейную отдачу при формировании консенсусного решения. Не всегда мнение самого авторитарного (или того, кому оказано максимальное групповое доверие) перевесит мнения остальных членов группы в итоговом решении. То есть рассматриваемые факторы не всегда являются определяющими при формировании консенсусного решения.

В частности, показано, что:

1) в малых группах в отличие от больших (при всех равных прочих факторах) высокое групповое доверие конкретному члену группы больше влияет на то, что вес его мнения будет учтен максимально;

2) в неоднородных группах высокая авторитарность членов служит блокирующим фактором для принятия равновесного решения в группе, мнение наиболее авторитарного члена учитывается с наибольшим весом в консенсусном решении;

3) найдены точки равновесия, при которых авторитарность и доверие членов группы перестают быть значимыми; показано, что эта точка зависит от размеров группы и в случае малочисленных групп (с числом членов не более 5) соответствует максимальной разности авторитарностей 0,2–0,3, а в больших группах соответствует разности, приближающейся к нулю;

4) в однородных группах большую роль играет групповое доверие, которое в высокой степени (с вероятностью, большей 0,87) определяет вес мнения соответствующего члена в консенсусном решении;

5) в больших группах в условиях отсутствия однородности роль факторов группового доверия и авторитарности ослабевает, консенсусное решение близко к равновесному.

Показано, что в случаях 2 и 3 итоговое решение будет опираться в большей степени на позицию одного члена группы, что может привести к консенсусу низкого качества в случае, если этот член группы не эксперт в рассматриваемом вопросе.

Полученные теоретические результаты выявления и анализа факторов, влияющих на перевес мнения в консенсусном решении, позволяют не допустить

ситуаций, когда возможно использовать процесс классического консенсуса для манипулирования исходом принятия решения.

### Список источников

1. Аймаутова Н.Е., Ушнев С.В. Специфика группового принятия решения // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Социология. 2003. №4-5. С. 213-218.
2. Hertzberg M., Smith R., Westphal R. A consensus handbook: Co-operative decision-making for activists, co-ops and communities. Seeds for Change Lancaster Cooperative Ltd. 2013. 228 p.
3. Полякова М.А., Извеков Ю.А., Дрягун Э.П. Использование математических моделей в области практической стандартизации // Качество. Инновации. Образование. 2023. №5(187). С. 69-77.
4. Максимова О.В., Аронов И.З. Математическая модель консенсуса в группе лояльных экспертов, построенная на основании регулярных марковских цепей // Компьютерные исследования и моделирование. 2023. Т. 15. №5. С. 1381-1393.
5. DeGroot M.H. Reaching a consensus // Journal of the American Statistical Association. 1974. vol. 69. №345.
6. Control of consensus convergence in technical committees of standardization on the basis of regular Markov chains model / Zazhigalkin A. V., Aronov I. Z., Maksimova O.V., Papic L. // Springer India: International Journal of Systems Assurance Engineering and Management. 2019, no. 1, pp. 1-8.
7. Maksimova O.V., Aronov I.Z. Achieving Consensus in Groups with Low Authoritarianism of Participants in Decision Making // International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences. 2024, vol. 9, no. 1, pp. 71-89.
8. Jackson M., Golub B. Naïve Learning in Social Networks and the Wisdom of Crowds // American Economic Journal: Microeconomics. 2010, vol. 2, no. 1, pp. 112-149.
9. Словохотов Ю.Л., Новиков Д.А. Распределенный интеллект мультиагентных систем. Ч. 2. Коллективный интеллект социальных систем // Проблемы управления. 2023. №6. С. 3-21.
10. Орлов А.И. Метод статистических испытаний в прикладной статистике // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. №5. С. 67-79.
11. Cook J., van der Linden S, Maibach E., Lewandowsky S. The Consensus Handbook: Why the Scientific Consensus on Climate Change is Important. 2018.
12. Чеботарев П.Ю. Сетевые многоагентные системы // Теория управления (дополнительные главы): учеб. пособие / под ред. Новикова Д.А. М.: Лепанд, 2019. С. 303-322.
13. Губанов Д.А., Новиков Д.А., Чхартишвили А.Г. Модели репутации и информационного управления в социальных сетях // Математическая теория игр и ее приложения. 2009. №1. С. 209-234.

14. A method for measuring consensus within groups: An index of disagreement via conditional probability / Akiyama Y., Nolan J.J., Darrah M., Rahem M.A., Wang L. // *Information Sciences*. 2016, no. 345, pp. 116-128.
15. A comparative study on consensus measures in group decision making / Del Moral M.J., Chiclana F., Tapia J.M.R., Herrera-Viedma E. // *International Journal of Intelligent Systems*. 2018, vol. 33, no. 8, pp. 1624-1638.
16. Hua Z., & Jing X. A generalized Shapley index-based interval-valued Pythagorean fuzzy PROMETHEE method for group decision-making // *Soft Computing*. 2023, vol. 27, no. 10, pp. 6629-6652.
17. De Vreede T., Reiter-Palmon R., De Vreede G. The Effect of Shared Mental Models on Consensus // 2013 46th Hawaii International Conference on System Sciences. 2013, pp. 263-272.
18. Myers D.G., Twenge J.M. *Social Psychology*. New York: McGraw Hill, 2021. 742 p.
19. Lewin K. *Resolving social conflicts: Selected Papers on Group Dynamis*. London: Souvenir Press (Educational & Academic), 1973. 230 p.
20. Mitchell T.W. *The psychology of medicine*. USA: Leopold Classic Library, 2017. 600 p.
21. Агаев Р.П., Чеботарев П.Ю. Лапласовские спектры орграфов и их приложения // *Автоматика и телемеханика*. 2005. №5. С. 47-62.
22. Альшуллер Г. С. Найти идею. Введение в ТРИЗ – теорию решения изобретательских задач. 4-е изд. М.: Альпина Паблишерз, 2011. 400 с.
23. Helmer O. Problems in futures research // *Futures*. 1977, vol. 9, no. 1, pp. 17-31.
24. Rowe G., & Wright G. Expert Opinions in Forecasting: The role of the Delphi Technique // *In International series in management science/operations research*. 2001, pp. 125-144.
25. Taylor E. We agree, don't we? The Delphi Method for Health Environments research // *Herd: Health Environments Research & Design Journal*. 2019, vol. 13, no. 1, pp. 11-23.
26. Kemeny J. G., Snell J. L. *Finite Markov chains*. Princeton: The University Series in Undergraduate Mathematics, 1960. 238 p.
27. Переверзева И.А. Проблема доверия в сфере бизнеса // *Иностранная психология*. 2000. № 12. С. 84-93.
28. Купрейченко А.Б. *Психология доверия и недоверия*. М.: Институт психологии РАН, 2008. 564 с.
29. Robbins S.P. *Organizational behavior: Concepts, Controversies, Applications*. New Jersey: Prentice-Hall International Inc., 1998.
30. School W. *Gruppenarbeit: Die Kluft zwischen sozialpsychologischer Theoriebildung und organisationspsychologischer Anwendung // Gruppendynamic*. 1997, vol. 28, no. 4, pp. 381-403.
31. Adorno T.W. The authoritarian personality. In SAGE Publications Ltd eBooks, 2001, pp. 81-90.
32. Efron B., Tibshirani R. Statistical data analysis in the computer age // *Sci.New Ser*. 253. 1991, no. 5018, pp. 390-395.
33. Aronov Iosif Z., Maksimova Olga V. Study of Factors Influence on the Variability of Time for Consensus Building in Coalitions Based on Regular Markov Chains // *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*. 2021, vol. 6, no. 4, pp. 1076-1088.
34. Аронов И.З., Максимова О.В. Математическая модель консенсуса в социальной группе при наличии лидера и руководителя // *Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования*. 2022. №2(66). С. 12-21.

#### References

1. Aymautova N.E., Ushnev S.V. Specific character of group decision making. *Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Sotsiologiya* [Bulletin of Peoples' Friendship University of Russia. Series: Sociology]. 2003;(4-5):213-218. (In Russ.)
2. Hertzberg M., Smith R., Westphal R. *A consensus handbook: Co-operative decision-making for activists, co-ops and communities*. Seeds for Change Lancaster Cooperative Ltd, 2013, 228 p.
3. Polyakova M.A., Izvekov Yu.A., Dryagun E.P. Using mathematical model in practical standardization. *Kachestvo. Innovatsii. Obrazovanie* [Quality. Innovation. Education]. 2023;(5(187)):69-77. (In Russ.)
4. Maksimova O.V., Aronov I.Z. Mathematical consensus model of loyal experts based on regular Markov chains. *Kompyuternye issledovaniya i modelirovaniye* [Computer Research and Modeling]. 2023;15(5):1381-1393. (In Russ.)
5. DeGroot M.H. Reaching a consensus. *Journal of the American Statistical Association*. 1974;69:Article ID 345.
6. Zazhigalkin A. V., Aronov I. Z., Maksimova O.V., Papic L. Control of consensus convergence in technical committees of standardization on the basis of regular Markov chains model. *Springer India: International Journal of Systems Assurance Engineering and Management*. 2019;(1):1-8.
7. Maksimova O.V., Aronov I.Z. Achieving consensus in groups with low authoritarianism of participants in decision making. *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*. 2024;9(1):71-89.
8. Jackson M., Golub B. Naïve learning in social networks and the wisdom of crowds. *American Economic Journal: Microeconomics*. 2010;2(1):112-149.
9. Slovkhotov Yu.L., Novikov D.A. Distributed intelligence of multi-agent systems. Part 2. Group intelligence of social systems. *Problemy upravleniya* [Control Sciences]. 2023;(6):3-21. (In Russ.)
10. Orlov A.I. A statistical test method in applied statistics. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* [Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials]. 2019;85(5):67-79. (In Russ.)

11. Cook J., van der Linden S, Maibach E., Lewandowsky S. The consensus handbook: Why the scientific consensus on climate change is important. 2018.
12. Chebotarev P.Yu. *Setevye mnogoagentnye sistemy. Teoriya upravleniya (dopolnitelnye glavy): ucheb. posobie* [Network multi-agent systems. Theory of control (additional chapters): study guide]. Novikov D.A. (Ed.). Moscow: Lenand, 2019, pp. 303-322. (In Russ.)
13. Gubanov D.A., Novikov D.A., Chkhartishvili A.G. Models of reputation and information control in social media. *Matematicheskaya teoriya igr i ee prilozheniya* [Mathematical Game Theory and Applications]. 2009;(1):209-234. (In Russ.)
14. Akiyama Y., Nolan J.J., Darrah M., Rahem M.A., Wang L. A method for measuring consensus within groups: An index of disagreement via conditional probability. *Information Sciences*. 2016;(345):116-128.
15. Del Moral M.J., Chiclana F., Tapia J.M.R., Herrera-Viedma E. A comparative study on consensus measures in group decision making. *International Journal of Intelligent Systems*. 2018;33(8):1624-1638.
16. Hua Z., Jing X. A generalized Shapley index-based interval-valued Pythagorean fuzzy PROMETHEE method for group decision-making. *Soft Computing*. 2023;27(10):6629-6652.
17. De Vreede T., Reiter-Palmon R., De Vreede G. The effect of shared mental models on consensus. *The 46th Hawaii International Conference on System Sciences*. 2013, pp. 263-272.
18. Myers D.G., Twenge J.M. *Social psychology*. New York: McGraw Hill, 2021, 742 p.
19. Lewin K. *Resolving social conflicts: Selected papers on group dynamics*. London: Souvenir Press (Educational & Academic), 1973, 230 p.
20. Mitchell T.W. *The psychology of medicine*. USA: Leopold Classic Library, 2017, 600 p.
21. Agaev R.P., Chebotarev P.Yu. Laplace spectra of orgraphs and their applications. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and remote control]. 2005;(5):47-62. (In Russ.)
22. Altshuller G.S. *Nayti ideyu. Vvedenie v TRIZ – teoriyu resheniya izobretatelskikh zadach* [Finding an idea. Introduction to TRIZ, the Theory of Inventive Problem Solving]. 4<sup>th</sup> ed. Moscow: Alpina Publishers, 2011, 400 p. (In Russ.)
23. Helmer O. Problems in futures research. *Futures*. 1977;9(1):17-31.
24. Rowe G., Wright G. Expert opinions in forecasting: The role of the Delphi technique. *International Series in Operations Research and Management Science*, 2001, pp. 125-144.
25. Taylor E. We agree, don't we? The Delphi method for health environments research. *Herd: Health Environments Research & Design Journal*. 2019;13(1):11-23.
26. Kemeny J. G., Snell J. L. *Finite Markov chains*. Princeton: The University Series in Undergraduate Mathematics, 1960, 238 p.
27. Pereverzeva I.A. Problem with trust in business. *Inostrannaya psikhologiya* [Foreign Psychology]. 2000;(12):84-93. (In Russ.)
28. Kupreychenko A.B. *Psikhologiya doveriya i nedoveriya* [Psychology of trust and distrust]. Moscow: Psychology Institute of the Russian Academy of Sciences, 2008, 564 p. (In Russ.)
29. Robbins S.P. *Organizational behavior: Concepts, controversies, applications*. New Jersey: Prentice-Hall International Inc., 1998.
30. School W. *Gruppenarbeit: Die Kluft zwischen sozialpsychologischer Theoriebildung und organisationspsychologischer Anwendung. Gruppendynamik*. 1997;28(4):381-403.
31. Adorno T.W. *The authoritarian personality*. SAGE Publications Ltd eBooks, 2001, pp. 81-90.
32. Efron B., Tibshirani R. Statistical data analysis in the computer age. *Sci.New Ser.* 1991;253(5018):390-395.
33. Aronov Iosif Z., Maksimova Olga V. Study of factors influence on the variability of time for consensus building in coalitions based on regular Markov chains. *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*. 2021;6(4):1076-1088.
34. Aronov I.Z., Maksimova O.V. A mathematical model of consensus in a social group where there is a leader and a head. *Informatsionno-ekonomicheskie aspekty standartizatsii i tekhnicheskogo regulirovaniya* [Information and Economic Aspects of Standardization and Technical Control]. 2022;(2(66)):12-21. (In Russ.)

Поступила 25.04.2024; принята к публикации 16.05.2024; опубликована 30.09.2024  
Submitted 25/04/2024; revised 16/05/2024; published 30/09/2024

**Максимова Ольга Владимировна** – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля, Москва, Россия; доцент кафедры математики, доцент кафедры сертификации и аналитического контроля, Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия.  
Email: o-maximova@yandex.ru. ORCID 0000-0002-0569-8650

**Olga V. Maksimova** – PhD (Eng.), Lead Researcher, Izrael Institute of Global Climate and Ecology, Moscow, Russia; Associate Professor of the Department of Mathematics, Associate Professor of the Department of Certification and Analytical Control, University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia.  
Email: o-maximova@yandex.ru. ORCID 0000-0002-0569-8650

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)  
УДК 658.562  
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-3-152-159



## ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОФАКТОРНОГО АНАЛИЗА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОДУКЦИИ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ

Прыткова Е.А., Давыдов В.М.

Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Россия

**Аннотация. Актуальность.** Сегодня машиностроительные организации сталкиваются с рядом проблем в рамках замещения иностранной продукции отечественной. Ввиду этого часто необходимым является оптимизация бизнес-процессов, в рамках которой следует проводить анализ качества машиностроительной продукции. Качество – один из важнейших инструментов в рыночной борьбе конкурентов, поэтому с целью улучшения деятельности машиностроительной организации следует уделять внимание качеству. **Цель работы.** Разработка авторского алгоритма использования многофакторного анализа качества машиностроительной продукции для оптимизации бизнес-процессов. **Используемые методы.** В статье используются общенаучные методы, прежде всего подходы и методы системного анализа и общей теории систем, анализ и синтез, а также сравнения и обобщения. Использование представленных методов позволило провести критический анализ точек зрения на особенности применения многофакторного анализа показателей качества машиностроительной продукции для оптимизации бизнес-процессов. **Новизна.** Разработан авторский алгоритм использования многофакторного анализа качества машиностроительной продукции для оптимизации бизнес-процессов. **Результаты.** Машиностроительные предприятия сталкиваются сегодня с необходимостью оптимизировать свои бизнес-процессы, что можно сделать на основании улучшения качества продукции. Однако процесс оптимизации требует ряда подготовительных работ. В рамках данной работы авторами представлен авторский алгоритм оптимизации бизнес-процессов на основании многофакторного анализа качества машиностроительной продукции. Основное внимание здесь уделяется выбору группы показателей качества и факторов. **Практическая значимость.** Возможность применения алгоритма в работе машиностроительных организаций с целью оптимизации бизнес-процессов.

**Ключевые слова:** многофакторный анализ, показатели качества, бизнес-процессы, машиностроительная продукция, оптимизация

© Прыткова Е.А., Давыдов В.М., 2024

### *Для цитирования*

Прыткова Е.А., Давыдов В.М. Применение многофакторного анализа показателей качества машиностроительной продукции для оптимизации бизнес-процессов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №3. С. 152-159. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-152-159>



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



# THE USE OF A MULTI-FACTOR ANALYSIS OF ENGINEERING PRODUCT QUALITY INDICATORS TO OPTIMIZE BUSINESS PROCESSES

Prytkova E.A., Davydov V.M.

Pacific National University, Khabarovsk, Russia

**Abstract. Relevance.** Today, machine-building organizations face a number of problems in the framework of replacing foreign products with domestic ones. In view of this, it is often necessary to optimize business processes, requiring an analysis of the quality of engineering products. Quality is one of the most important tools in the market among competitors; therefore, to improve the performance of a machine-building organization, attention should be paid to quality. **Objectives.** The research is aimed at developing an author's algorithm for using a multi-factor analysis of the quality of engineering products to optimize business processes. **Methods Applied.** The article uses general scientific methods, mainly approaches and methods of a system analysis and general theory of systems, analysis and synthesis, as well as comparison and generalization. The presented methods were used to conduct a critical analysis of points of view on the specific features of using the multi-factor analysis of engineering product quality indicators to optimize business processes. **Originality.** The article presents the developed author's algorithm for using the multi-factor analysis of the quality of engineering products to optimize business processes. **Results.** Now, machine-building enterprises face the need to optimize their business processes, which can be done on the basis of improving the product quality. However, the optimization process requires some preparatory work. As part of this research, the authors present the author's algorithm for optimizing business processes based on a multi-factor analysis of the quality of engineering products, mainly focusing on choosing a group of quality indicators and factors. **Practical Relevance.** The algorithm may be used in business of machine-building organizations to optimize business processes.

**Keywords:** multi-factor analysis, quality indicators, business processes, engineering products, optimization

## For citation

Prytkova E.A., Davydov V.M. The Use of a Multi-Factor Analysis of Engineering Product Quality Indicators to Optimize Business Processes. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 3, pp. 152-159. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-152-159>

## Введение и постановка задачи

Для сферы машиностроения бизнес-процессы, которые взаимосвязаны между собой, уникальны и формируют непосредственно его деятельность. Эффективно управлять предприятием можно только в том случае, если все бизнес-процессы полны и точны и понимаются управляющими, а все операции и цепочки взаимодействия совершенствуются. Ввиду этого оптимизация бизнес-процессов – это одно из основных направлений совершенствования деятельности организации в целом.

Одним из факторов, обеспечивающих оптимизацию бизнес-процессов на машиностроительных предприятиях, является повышение качества продукции. Качество продукции машиностроения является общим показателем научно-технического прогресса и культуры производства в машиностроении. Успех предприятия в современных экономических условиях неразрывно связан с качеством его продукции.

Многогранность характера является одной из характеристик качества машиностроительной продукции. То есть речь идет о том, что, с одной стороны, данная продукция должна удовлетворять потребности перерабатывающей промышленности на определенном науч-

но-техническом уровне, а с другой – такая продукция является непосредственно результатом научно-технического прогресса. Если говорить о конкурентоспособности товара или же непосредственно предприятия в целом, то качество продукции в условиях рынка – это один из ключевых факторов в данном случае.

Актуальность темы обусловлена тем фактом, что на данном этапе развития ввиду того, что зарубежная продукция все еще опережает по качеству отечественных производителей, необходимы разработки, как теоретические, так и методические, с целью повышения качества машиностроительной продукции.

Целью исследования является авторский алгоритм использования многофакторного анализа качества машиностроительной продукции с целью оптимизации бизнес-процессов. Основные задачи исследования включают: в первую очередь, определение ключевых показателей качества машиностроительной продукции, во-вторую очередь, анализ критериев и методов оптимизации бизнес-процессов, в-третьих, непосредственно разработку алгоритма.

К исследованию данной темы обращались такие авторы, как Асламов З.Ю. в своей работе «Анализ оценки систем качества продукции машиностроения» [3]. Методику использования бенчмаркиговых тех-

нологий для повышения качества машиностроительной продукции рассматривал Баринов М.В. [4]. Также интересно исследование Беловой Н.С. и Непомилуева В.В., анализирующих обеспечение качества продукции машиностроительного предприятия на основе совершенствования процесса поставок [5]. Вопросы управления качеством машиностроительной продукции и оптимизации уделяли внимание в своей работе и Гузанов Б.Н. с Бухаленковым В.В. [6].

Вызывает интерес и работа Дремовой В.Б. «Методологические аспекты управления производственными процессами показателей качества машиностроительной продукции», в которой также выделены показатели качества машиностроительной продукции, позволяющие оптимизировать бизнес-процессы [7]. Такое же исследование проведено и Жетесовой Г.С., Жунусовой А.Ш. и Тагтимбетовой Г.Б. [9]. Среди зарубежных авторов вопросу управления качеством и определения показателей уделял внимание Vesnik H.Q. [1]

Непосредственно методике управления бизнес-процессами на предприятии уделяли внимание такие авторы, как Егорова А.Е., Агалакова А.В. [8] и Лаврентьева Е.В. [10]. В своих исследованиях данные авторы отразили различные подходы к оптимизации, которые основаны на применении различных инструментов, в частности: STEP- и SWOT-анализы, построение дерева проблем, гистаграммы, диаграммы связей, диаграммы Паретто, карты ресурсного потенциала. Также подходы к оптимизации бизнес-процессов анализировали такие зарубежные исследователи, как Orlenys López-Pintado, Marlon Dumas, Jonas Berx [2].

### Материалы и методы исследования

В статье используются различные методы исследования, которые позволяют провести всесторонний и глубокий анализ проблемы применения многофакторного анализа показателей качества машиностроительной продукции для оптимизации бизнес-процессов.

Среди основных методов выделяются общенаучные, в частности анализ и синтез, которые позволили разделить исследуемую проблему на составляющие элементы и объединить их в единое целое для более полного понимания проблемы. Методы сравнения и обобщения позволили сравнить различные точки зрения на исследуемый вопрос и обобщить данный материал.

Методы системного анализа и общей теории систем позволили рассмотреть данную проблему исходя из всей системы в целом, при этом принимая во внимание все взаимосвязи, существующие между различными элементами системы и учитывая их влияние на качество машиностроительной продукции.

### Полученные результаты и их обсуждение

На данном этапе менеджеры организаций по большей мере имеют базовые знания о процессном управлении, что приводит к недостаточной развитости системы управления бизнес-процессами на машиностроительных предприятиях. Одной из причин такой ситуации может

быть тот факт, что уже на этапе идентификации бизнес-процессов появляется ряд трудностей относительно использования сложных методов, стандартов, различного рода метрик, ряда количественных показателей, которые характерны для бизнес-процессов. Повышение эффективности будет более высоким, если ориентировать программы обучения не на владельцев процессов, отвечающих непосредственно за организационные операции и функции управления, а непосредственно на менеджеров среднего звена [2].

Для каждого машиностроительного предприятия характерно влияние ряда факторов, как внутренних, так и внешних. Ввиду этого их необходимо постоянно оценивать, и оказать помощь с этим может использование таких методов, как STEP-анализ, SWOT-анализ, деревья проблем, гистограммы, диаграммы связей, диаграммы Парето и карты ресурсного потенциала.

При анализе бизнес-процессов необходимо использовать различные методы качественной и количественной оценки, которые позволяют всесторонне оценить эффективность процесса и принять меры по его оптимизации [8, с. 49].

С помощью оптимизации бизнес-процессов можно достичь ряд улучшений, в частности:

- уровень конкурентоспособности продукции будет повышен;
- внутренний рынок продукции машиностроения станет более широким;
- инновационные производства, которые уже работают, станут более модернизированы;
- с помощью информационных технологий и искусственного интеллекта будут создаваться новые производства;
- сотрудники и их производительность будут постоянно развиваться и улучшаться;
- начнется производство оборудования, которое будет не только высокопроизводительным, но также и экономически эффективным;
- инвестиционная привлекательность организации, отрасли станет улучшаться.

К оптимизации сегодня прибегает все больше и больше организаций, несмотря на тот факт, что это достаточно трудоемкий и дорогой процесс. Наличие грамотных специалистов в этом случае недостаточно. Необходимо, чтобы руководители организаций знали все нюансы оптимизации, принимали в ней непосредственное участие и руководили действиями других сотрудников. При этом оптимизировать процессы самостоятельно они не должны. Их задача – эффективное руководство грамотными специалистами.

В своей деятельности машиностроительные предприятия сталкиваются с рядом проблем [10, с. 152]:

- производственные мощности редко когда бывают загружены на полную мощность;
- с внутреннего рынка очень часто зарубежные производители вытесняют отечественных;
- использование инноваций в данной отрасли пока что на низком уровне;

– заработная плата специалистов в этой отрасли не на должном уровне;

– старение кадров в этой отрасли также одна из проблем, за счет того, что профессии данной отрасли стали менее популярны.

Все это свидетельствует о том, что оптимизация производственных процессов, позволяющая повысить качество машиностроительной продукции, является в сложившихся условиях крайне необходимой мерой.

Интеграция производственного процесса на машиностроительном предприятии – это совокупность всех производственных процессов, которые реализуются на предприятии.

В то же время комплекс технологических процессов, которые имеют взаимосвязи между собой и на которые оказывают влияние характер и особенности выпускаемой продукции, представляют собой производственный процесс. Он также находится под влиянием ряда факторов, а именно особенностей технологического процесса. Ввиду этого рационализация и оперативное управление производственными процессами позволит обеспечить их эффективное выполнение. При этом все процессы организации должны быть правильно организованными, так как это позволит повысить эффективность функционирования производства. Кроме этого, положительным моментом будет также и то, что текущие расходы будут снижены за счет правильной организации процессов.

Сложность компонентов такой отрасли, как машиностроение, и обуславливает в основном такой интерес к ней. Выпуск собственной продукции данной отрасли становится возможным за счет того, что машиностроительные организации используют продукцию организаций из разных отраслей.

Качество является одним из важнейших инструментов конкуренции на рынке. Именно оно дает гарантии конкурентоспособности продукции. Качество охватывает технический уровень продукта и его полезность для потребителя, обусловленную функциональными, социальными, эстетическими, эргономическими и экологическими характеристиками [3, с. 56]. Конкурентоспособность в данном случае определяется сочетанием качественных и стоимостных характеристик товара, позволяющих ему удовлетворять потребности потребителей, а также затрат на приобретение и потребление данного товара [6, с. 7].

При этом следует учитывать, что среди продуктов с одинаковыми целями более конкурентоспособными являются те, которые обеспечивают наибольший эффект выгоды по отношению к совокупным затратам потребителя. Безусловно, повышение качества требует больших затрат. Однако оно компенсируется за счет увеличения прибыли. Невозможно добиться лидирующего положения на рынке без разработки и освоения новых (улучшенных и более совершенных) продуктов. То есть для производства собственной продукции высокого качества организации машиностроения обобщают и перерабатывают качественные характеристики продукции из отраслей смежного характера.

Качество продукции требует постоянного внимания со стороны организации ввиду современного развития рынка, когда именно этот фактор является ключевым в достижении эффективной деятельности организации. Вопрос качества должен волновать не только руководителя организации, но и самого исполнителя, то есть всех, кто принимает участие в производстве продукции.

Интенсивное развитие экономики, экономический рост и эффективность общественного производства станут возможными именно при повышении качества продукции. По этой причине сегодня повышается значимость данного вопроса. Однако эффективное управление качеством продукции будет возможно только тогда, когда все участники знают о том, какие факторы оказывают влияние на качество продукции.

Стоит отметить, что в процесс создания продукции вовлечено достаточно большое число участников, что стало основной для такой концепции по управлению качеством, как TQM. Ее смысл в том, что в повышении качества продукции и процессов принимают активное участие почти все сотрудники организации. Именно поэтому сегодня она одна из передовых. Также ранее мы уже говорили о том, что на нее оказывают влияние как внешние, так и внутренние факторы. Обратим внимание, что те, на которые организация не может оказать влияние, относятся к внешним, а те же, на которые организация может влиять, – к внутренним [9, с. 21].

В их числе можно выделить такие, как:

1. Технические факторы или материальная база. Именно от них по большей мере зависит качество продукции, в их числе могут быть и новые технологии, и модернизированное оборудование, которые позволяют организации выпускать высококачественную и конкурентную продукцию.

2. Организационные факторы. В данном случае имеется ввиду продуманность организационной структуры организации, эффективное управление данной структурой. Ряд организационных вопросов должен содержать в себе вопросы относительно повышения качества организации труда, контроль за трудовой дисциплиной, повышение квалификации персонала.

3. Затраты на производство и реализацию продукции также крайне важны, ввиду этого экономические факторы – еще одна из групп внутренних факторов. На качество продукции будут оказывать влияние ценовая политика, система мотивирования персонала. Особое внимание следует уделять непосредственно последнему вопросу, так как от того, насколько замотивирован персонал, будет зависеть его производительность.

4. Повысить уровень заинтересованности у сотрудников к повышению качества продукции можно за счет социально-психологических факторов, в числе которых улучшение условий труда, повышение лояльности к персоналу со стороны организации.

В рамках данного исследования авторами был разработан алгоритм оптимизации бизнес-процесса на основании многофакторного анализа качества (см.

рисунком). Новизна данного алгоритма состоит в том, что авторы объединили в нем различные этапы, с учетом показателей, наиболее влияющих на качество непосредственно машиностроительной продукции, а также критериев и методов оптимизации. То есть данный алгоритм является более полным и учитывает

наибольшее число факторов. Соответственно, на первом этапе необходимо проводить анализ бизнес-процессов, в рамках которого специалисту необходимо провести экспертизу всех процессов, сделать анализ взаимовлияющих факторов, определить направления улучшения.



Рисунок. Алгоритм оптимизации бизнес-процессов на основании многофакторного анализа качества продукции машиностроения (составлено авторами)

Figure. Algorithm for optimizing business processes based on a multi-factor analysis of the quality of engineering products (compiled by the authors)

На этапе проектирования/оптимизации бизнес-процессов определяются основные цели и планируются изменения на основании многофакторного анализа качества продукции.

Для оценки уровня качества или системы качества машиностроительной продукции характерно несколько этапов (см. **рисунок**). Цели ставятся на подготовительном первом этапе. Именно тогда формируются и задачи, которые необходимо решить в рамках оценки качества.

Рабочие экспертные комиссии должны формироваться заранее. На главного менеджера по качеству возлагается координация всего процесса.

Выбор ряда необходимых показателей происходит на следующем этапе. Он является достаточно важным, так как в него входят классы и группы оцениваемой продукции; определяется целевое назначение номенклатуры выбранных показателей; определяется необходимая номенклатура показателей качества продукции.

В числе данных показателей можем выделить те, которые, по нашему мнению, наиболее влияют на качество машиностроительной продукции, среди них:

- точность размеров и геометрии;
- механические свойства;
- поверхностные характеристики исходя из продукции;
- надежность и долговечность;
- химический состав материалов;
- однородность структуры;
- отсутствие дефектов (трещин, пустот и пр.);
- соблюдение технологических допусков;
- производительность;
- уровень шума и вибраций;
- эргономичность и удобство в использовании;
- соответствие ГОСТ, ISO и другим стандартам;
- экономические показатели;
- клиентская удовлетворенность;
- логистические показатели.

В настоящее время для анализа и контроля качества выпускаемой машиностроительной продукции необходимо анализировать не только показатели, но и такие факторы, как:

- факторы качества производственных процессов;
- координация технологических процессов;
- систематический контроль качества на отдельных участках производственного процесса;
- оценка показателей качества конечной продукции.

Фактические числовые значения показателей качества, которые оцениваются, должны получаться из определенных источников информации, которые и определяются. Расчетный, экспертный, социологический методы – это те методы, которые можно использовать для получения данных фактических показателей.

Выявляются источники информации о ключевых показателях качества, определяются их численные значения и условия существования.

Выбор методов оценки, технические исследования, определение перечня необходимых показателей, непосредственно сам анализ результатов относятся к этапу оценки уровня качества. После того как оцениваемые показатели сравнили с базовыми, исходя из критериев и методов оптимизации бизнес-процессов, происходит формирование рекомендаций. Целесообразно отметить, что с целью наиболее эффективного результата оптимизации рекомендуется использование нескольких методов одновременно. Например, процессный подход и картирование процессов помогут выявить узкие места, а бережливое производство и шесть сигм позволят устранить потери и снизить вариабельность.

Следующий этап – это непосредственно внедрение оптимизированных бизнес-процессов и заключительный этап – это оценка результатов внедрения, то есть контроль.

Стоит отметить, что распределение задач по оценке уровня качества продукции будет более эффективным, если будет распределено между специалистами-практиками.

### Заключение

Таким образом, машиностроительные предприятия сталкиваются сегодня с необходимостью оптимизировать свои бизнес-процессы, что можно сделать на основании улучшения качества продукции. Однако процесс оптимизации требует ряда подготовительных работ.

В рамках данной работы автором представлен авторский алгоритм оптимизации бизнес-процессов на основании многофакторного анализа качества машиностроительной продукции. Основное внимание здесь уделяется выбору группы показателей качества и факторов, в числе которых были выделены такие, как: точность размеров и геометрии; механические свойства; поверхностные характеристики исходя из продукции; надежность и долговечность; химический состав материалов; однородность структуры; отсутствие дефектов (трещин, пустот и пр.); соблюдение технологических допусков; производительность; уровень шума и вибраций; эргономичность и удобство в использовании; соответствие ГОСТ, ISO и другим стандартам; экономические показатели; клиентская удовлетворенность; логистические показатели. Также в алгоритме учитываются критерии и методы оптимизации бизнес-процессов.

Полученные результаты могут быть использованы для повышения эффективности производственных процессов и улучшения качества машиностроительной продукции, что приведет к оптимизации бизнес-процессов и увеличению конкурентоспособности продукции на рынке.

## Список источников

1. Besnik Hajdari Quality management and classification in engineering products // International Journal of Social Science and Economic Research. URL: [www.researchgate.net/publication/362219196](http://www.researchgate.net/publication/362219196)
2. Orlenys López-Pintado, Marlon Dumas, Jonas Berx Discovery. Simulation and optimization of business processes with differentiated resources // Information Systems. 2024, vol. 120, 102289. URL: <https://doi.org/10.1016/j.is.2023.102289>
3. Асламов З.Ю. Анализ оценки систем качества продукции машиностроения // International scientific review. 2019. С. 56-59.
4. Баринов М.В. Методика использования бенчмаркиговых технологий для повышения качества машиностроительной продукции // Успехи современной науки. 2017. Т. 7. №4. С. 170-175.
5. Белова Н.С., Непомилуев В.В. Обеспечение качества продукции машиностроительного предприятия на основе совершенствования процесса поставок // Вестник РГАТА имени П. А. Соловьева. 2018. №1 (44). С. 90-94.
6. Гузанов Б.Н., Бухаленков В.В. Структура содержания системы управления качеством машиностроительной продукции // Молодой ученый. 2018. №12-3 (116). С. 7-10.
7. Дремова В.Б. Методологические аспекты управления производственными процессами показателей качества машиностроительной продукции // Будущее науки-2016: сборник научных статей 4-й Международной молодежной научной конференции: в 4-х т. / отв. ред. Горохов А.А. Курск, 2016. С. 61-66.
8. Егорова А.Е., Агалакова А.В. Методика управления бизнес-процессами на предприятиях отрасли машиностроения // Транспорт и логистика: актуальные вопросы, проектные решения и инновационные достижения: материалы Всероссийской научно-практической конференции. Красноярск, 2020. С. 49-51.
9. Жетесова Г.С., Жунусова А.Ш., Таттимбетова Г.Б. Оптимизация показателей качества машиностроительной продукции // Труды университета. 2014. № 1 (54). С. 21-24.
10. Лаврентьева Е.В. Оптимизации технологического сегмента бизнес-процессов управления на предприятиях машиностроения // Конкурентоспособность в глобальном мире: экономика, наука, технологии. 2023. №4. С. 152-156.
11. Social Science and Economic Research. Available at: [www.researchgate.net/publication/362219196](http://www.researchgate.net/publication/362219196)
12. Orlenys López-Pintado, Marlon Dumas, Jonas Berx. Discovery, simulation, and optimization of business processes with differentiated resources. Information Systems. 2024;120:Article ID 102289. <https://doi.org/10.1016/j.is.2023.102289>
13. Aslamov Z.Yu. Analysis of the assessment of quality systems of engineering products. *Mezhdunarodnyi nauchnyi obzor* [International Scientific Review]. 2019;56-59. (In Russ.)
14. Barinov M.V. Methodology of using benchmarking technologies to improve the quality of engineering products. *Uspekhi sovremennoy nauki* [Success in Modern Science]. 2017;7(4):170-175. (In Russ.)
15. Belova N.S., Nepomiluev V.V. Ensuring the quality of products of a machine-building enterprise on the basis of improving the supply process. *Vestnik RGATA imeni P.A. Soloveva* [Vestnik of Solovev Rybinsk State Aviation Technical University]. 2018;(1(44)):90-94. (In Russ.)
16. Guzanov B.N., Bukhalenkov V.V. The structure of the content of the quality management system of engineering products. *Molodoy uchenyi* [Young Scientist]. 2018;(12-3(116)):7-10. (In Russ.)
17. Dremova V.B. Methodological aspects of production process management of engineering product quality indicators. *Budushchee nauki-2016: sbornik nauchnykh statey 4-y Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii: v 4-kh t.* [Future of Science-2016: Collection of research articles of the 4th International Youth Scientific Conference: in 4 volumes]. Gorokhov A.A. (Ed.). Kursk, 2016, pp. 61-66. (In Russ.)
18. Egorova A.E., Agalakova A.V. Methods of business process management at machine building enterprises. *Transport i logistika: aktualnye voprosy, proektnye resheniya i innovatsionnye dostizheniya: Materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Transport and logistics: Current issues, design solutions and innovative achievement. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference]. Krasnoyarsk, 2020, pp. 49-51. (In Russ.)
19. Zhetesova G.S., Zhunusova A.Sh., Tattimbetova G.B. Optimization of quality indicators of engineering products. *Trudy universiteta* [Proceedings of the University]. 2014;(1(54)):21-24. (In Russ.)
20. Lavrenteva E.V. Optimization of the technological segment of management business processes at machine building enterprises. *Konkurentosposobnost v globalnom mire: ekonomika, nauka, tekhnologii*. [Competitiveness in the Global World: Economics, Science, Technology]. 2023;(4):152-156. (In Russ.)

## References

1. Besnik Hajdari. Quality management and classification in engineering products. International Journal of

Поступила 17.04.2024; принята к публикации 09.07.2024; опубликована 30.09.2024  
Submitted 17/04/2024; revised 09/07/2024; published 30/09/2024

**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 of the Department of Technological Informatics and Information Systems, Pacific National University, Khabarovsk, Russia.  
Email: ev-prutkova@mail.ru

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

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)  
УДК 658.5  
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-3-160-169



## РАЗРАБОТКА ГИБКОЙ СИСТЕМЫ ПЛАНИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ПРОГРАММЫ В УСЛОВИЯХ РАБОТЫ С ГОСЗАКУПКАМИ

Третьякова В.А., Горлачева Е.Н.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет),  
Москва, Россия

**Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы).** Проблема эффективной реализации производственной программы во многом зависит от слаженности и корректности планирования. Однако в условиях госзакупок предприятиям машиностроительного комплекса довольно сложно выстроить четкую и определенную систему планирования в силу особенностей существующей системы госзакупок. Существующие системы планирования производственной программы, как правило, не учитывают сложности получения государственных заказов, нет четкой процедуры, как руководителю принимать решения об участии в госзакупках в условиях неопределенности. Объективная потребность в разработке подобного алгоритма и обуславливает актуальность данной статьи. **Цель работы.** Разработать гибкую систему планирования для предприятий машиностроительного комплекса, обеспечивающих загрузку своих производственных мощностей через систему госзакупок. **Используемые методы.** В качестве методологической рамки исследования используется логический анализ, адаптированный к данной научной задаче. **Новизна.** Анализ имеющихся литературных источников показал, что реализация функции планирования не рассматривается в контексте госзакупок. Научная новизна заключается как в постановке научной проблемы, так и в попытке предложить работающий механизм планирования, необходимый для промышленных предприятий, получающих заказы через систему госзакупок. Отличительной особенностью предлагаемой системы планирования является идея исследования процесса планирования на более длительном временном промежутке: от момента анализа и прогнозирования конкурсных заявок до формирования производственной программы. Гибкость предложенной системы планирования проявляется в вариативности выбора принятия решений об участии в госзакупке и моделировании тактики действий на более длительном временном промежутке. **Результат.** Разработана гибкая система планирования производственной программы и предложен механизм ее реализации. **Практическая значимость.** В работе предложена попытка ответа на насущную потребность промышленных предприятий в разработке гибкой системы планирования производственной программы с участием в госзакупках.

**Ключевые слова:** планирование, организация производства, производственная программа, промышленное предприятие, производственные мощности, госзакупка

© Третьякова В.А., Горлачева Е.Н., 2024

### Для цитирования

Третьякова В.А., Горлачева Е.Н. Разработка гибкой системы планирования производственной программы в условиях работы с госзакупками // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №3. С. 160-169. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-160-169>



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



# THE ELABORATION OF THE FLEXIBLE PRODUCTION PROGRAM PLANNING SYSTEM IN TERMS OF THE PUBLIC PROCUREMENT SYSTEM

Tretyakova V.A., Gorlacheva E.N.

Bauman Moscow State Technical University (National Research University), Moscow, Russia

**Abstract. Problem Statement (Relevance).** The problem of the efficient production program implementation depends on the coherence and correctness of the planning procedure. However, in terms of the public procurement system it is quite difficult for enterprises of the machine building complex to build a clear and definite planning system because of peculiarities of the existing public procurement system. The existing production program planning systems, as a rule, do not factor into the complexity of obtaining public orders, there is no clear procedure how a manager should make decisions on taking part in public procurement under uncertainty. The objective need to develop such an algorithm determines the relevance of this paper. **Objectives.** The study is aimed at elaborating a flexible planning system for the enterprises of the machine building complex, ensuring their production capacity by orders of the public procurement system. **Methods Applied.** A logical analysis adapted to this scientific objective is used as the methodological framework of the study. **Originality.** The analysis of the available literature has shown that the implementation of the planning function is not considered in the context of the public procurement. The scientific originality lies both in the formulation of a scientific problem and an attempt to propose a working planning mechanism necessary for industrial enterprises receiving orders through the public procurement system. A distinctive feature of the proposed planning system is the idea of studying the planning process over a longer time period: from the analysis and forecasting of bidding applications to the preparation of a production program. Flexibility of the proposed planning system is determined by the variability of the choice of making decisions on taking part in public procurement and modeling tactics for a longer time period. **Received Results.** The paper presents a developed flexible production program planning system and a proposed mechanism for its implementation. **Practical Relevance.** The paper offers an attempt to respond to the urgent need of industrial enterprises to develop a flexible production program planning system with participation in public procurement.

**Keywords:** planning, industrial organization, production program, industrial enterprise, production facilities, public procurement

## For citation

Tretyakova V.A., Gorlacheva E.N. The Elaboration of the Flexible Production Program Planning System in Terms of the Public Procurement System. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 3, pp. 160-169. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-160-169>

## Введение

В настоящее время большая часть предприятий машиностроительного комплекса столкнулась с серьезными вызовами, влияющими на их непосредственную деятельность: недоступность привычных технологий, высокая волатильность рубля, блокировка импортного программного обеспечения, прекращение поставок расходных материалов и запасных частей, ряд других неблагоприятных факторов. К неблагоприятным внешним обстоятельствам добавляются также и внутренние: для машиностроительных предприятий характерна относительно невысокая эффективность использования методов и средств организации производственных процессов, отсутствие или небрежное отношение к применению гибких методов и средств планирования производственных программ, кадровый дефицит специалистов и, как следствие, низкая производительность ресурсов в целом.

Однако от способности машиностроительных предприятий перестроиться в новых условиях, быстро адаптироваться под новые требования (увеличение уровня сложности организационно-экономических решений, постоянный рост требований, предъявляемых к изделиям) зависит их дальнейшее существование и эффективное функционирование, поэтому формирование гибкой системы планирования производственной программы имеет значение. В этой связи госзакупки становятся одним из драйверов внутреннего спроса и поддержки машиностроительных предприятий. Однако механизм госзакупок предполагает прохождение конкурсных процедур, участие в которых не всегда является выигрышным для конкретного предприятия. В этой связи возникает необходимость разработки гибкой системы планирования производственной программы, позволяющей учитывать неопределенность выигрыша/проигрыша в конкурсе.

Научно-методическим проблемам формирования и реализации адаптивных систем планирования посвящено немало работ [1-14]. В работе Моисеенковой Д.А., Смирнова А.Н. [1] подчеркивается, что производственное планирование является действенным инструментом для определения и выбора факторов, способствующих достижению производственных целей. Отдается предпочтение информационным системам предприятия для формирования единого информационного пространства. Логунова О.С., Аркулис М.Б. в своей работе [2] приводят описание инструментального решения для оперативно-календарного планирования многостадийного производства.

Вопросы же разработки гибких систем планирования в условиях работы по госзакупкам либо рассматриваются точно, либо не рассматриваются вообще [3-14]. С одной стороны, система госзакупок выступает драйвером спроса на машиностроительную продукцию, но с другой – низкая вероятность выигрыша удерживает машиностроительные предприятия от участия в процедуре госзакупок.

Цель данной статьи – попытаться ответить на насущную потребность предприятий машиностроительного комплекса в разработке гибкой системы планирования производственной программы с участием в госзакупках. Отличительной особенностью предлагаемой системы планирования является идея исследования процесса планирования на более длительном временном промежутке: от момента анализа и прогнозирования конкурсных заявок до формирования и реализации производственной программы. Гибкость предложенной системы планирования проявляется в вариативности выбора принятия решений об участии в госзакупке и моделировании тактики действий на более длительном временном промежутке. Подобный подход отражает особенность предприятий машиностроительного комплекса, которые производят материальную продукцию, а следовательно, для выполнения условий должны заблаговременно озаботиться наличием необходимых запасов для ее производства.

Статья структурирована следующим образом: во введении обоснована актуальность и практическая необходимость промышленных предприятий в гибкой системе планирования производственной программы; в теоретической части проведен литературный обзор работ по проблемам формирования гибкой системы планирования; в основной части – предло-

жена модель планирования производственной программы, описаны последовательные этапы ее формирования, сформулированы условия участия в конкурсных процедурах с привязкой к производственной программе предприятия, в заключении представлены выводы и дальнейшие направления исследования.

### **Анализ литературных источников**

Проведенный обзор научных работ позволил выявить три основных направления в области производственного планирования: техническое, инструментальное и инженерно-экономическое. Как правило, в инженерно-экономических работах отмечается важность планирования как непосредственной функции управления: рассматриваются принципы планирования и подходы [3]; взаимосвязь планирования с производственной программой [1]; стратегические аспекты планирования с производственными мощностями [4]. В данных работах авторы в большей степени рассматривают влияние планирования на общую доходность и рентабельность предприятия.

В рамках технического направления авторы акцентируют внимание на математической формализации процесса планирования, его оптимизации. Как правило, авторы больше концентрируются на решении задачи планирования для конкретного промышленного предприятия.

Для инструментального направления характерно исследование проблем формирования единого информационного пространства, реализации различных программных средств и информационных систем для организации планирования производства. В **табл. 1** представлены основные направления исследований производственного планирования.

Проведенный обзор показал, что тема производственного планирования востребована, поскольку именно функция планирования дает возможность существенно повысить качество управления и улучшить эффективность производственных процессов. Несмотря на существенный пласт работ по этой проблеме, вопросы взаимосвязи участия в госзакупках и дальнейшего планирования производственной программы не рассматриваются. Если посмотреть на представленность университетов, то по большей части темой планирования больше занимаются технические университеты – сказывается большая взаимосвязь с производственными предприятиями.

Таблица 1. Обзор работ в области производственного планирования  
 Table 1. A literature review in production planning

Основные направления исследования	Авторы	Предлагаемые модели, методы, подходы	Университет
Исследования в области техники	Абрамов А.А., Шершаков И.С. [5]	Предложена обобщенная математическая модель производственного предприятия; предложена методика определения величины загрузки производственных мощностей в каждом производственном цикле, разработана методика прогнозирования спроса на продукцию на основе метода автономного адаптивного управления	Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
	Боева Л.М., Коврижных О.А. [6]	Реализация технологий гибких производственных систем	Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова
	Гусев Е.В., Бородин С.И. [7]	Предложена система двухэтапного планирования	Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)
	Чаруйская М.А. [8]	Предложена матрица выбора оптимальных методов планирования	Московская высшая школа инжиниринга
Исследования в области инструментальных средств	Симченко О.Л., Чазов Е.Л., Камдина Л.В., Антонов И.А., Вихарев А.Д. [9]	Предложен концептуальный подход к оценке результативности внедрения интегрированной информационной системы в деятельность предприятия	Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова
	Логунова О.С., Аркулис М.Б. [1]	Предложена математическая модель и программная реализация автоматизированной системы оперативного календарного планирования многостадийного производства	Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова
	Власов Р.Г., Коробов Ю.С., Кузнецова Е.Ю. [10]	Применение технологий машинного обучения для расчета длительности производственного цикла	Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
	Аркин П.А., Соловейчик К.А., Аркина К.Г. [11]	Предложен алгоритм взаимодействия модуля прогнозирования межцеховой загрузки	Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Исследования в области инженерно-экономических наук	Федосеев С.А., Вожаков А.В., Гитман М.Б. [12]	Предложена модель календарного планирования производства с нечеткими критериями и ограничениями	Пермский национальный исследовательский политехнический университет
	Титов В.В., Безмельницын Д.А. [13]	Предложен подход к согласованию стратегического и оперативного управления для серийного производства сложных изделий на основе совмещения задач объемно-календарного, оперативно-календарного и сетевого планирования	Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН
	Замбрицкая Е.С. [4]	Предложен подход к управлению производственными мощностями	Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова
	Долженко Р.А., Долженко С.Б., Малышев Д.С. [14]	Предложена методика повышения организационной эффективности	Уральский государственный экономический университет

Этапы разработки гибкой системы планирования

В связи с тем, что производственным предприятиям необходимо подстраиваться под требования действующего законодательства и одновременно стараться обеспечить достаточную рентабельность своей деятельности, им необходимо разрабатывать новые подходы к планированию своей производственной программы. Решением обозначенной выше проблемы может служить создание динамической, то есть гибкой, системы планирования, позволяющей предприятию вносить в нее изменения с учетом изменения спроса и ситуации на рынке госзакупок.

Построение такой системы будет включать в себя несколько этапов (рис. 1):

Этап 1. Анализ и прогнозирование.

1. Анализ рынка госзакупок по производимым продуктам за прошлый период.

2. Анализ План-графиков и планов закупок Заказчиками.

3. Прогнозирование спроса на рынке госзакупок в перспективе на год.

4. Прогнозирование победы в конкурсах и принятие решения об участии.

5. Составление прогнозного плана закупок на рынке госуслуг с учетом интересов предприятия.

6. Разработка прогнозной производственной программы с учетом полученных прогнозов в перспективе на год.

Этап 2. Фактические конкурсы и производственная программа.

1. Анализ фактически объявленных конкурсов.

2. Анализ возможности участия (на основе прогнозной производственной программы) и оценка вероятности победы.

3. Принятие решения об участии в объявленном конкурсе.

4. Участие и победа в объявленном конкурсе.

5. Корректировка прогнозной производственной программы – Фактическая производственная программа.

В настоящее время вся информация о государственных закупках в России собрана в Единой информационной системе (ЕИС), что значительно упрощает исследование рынка госзакупок [15]. Следовательно, появляется возможность достаточно точно провести анализ такого рынка, а значит, производственное предприятие получает возможность выстроить свои процессы и организовать свое производство, учитывая все эти особенности.

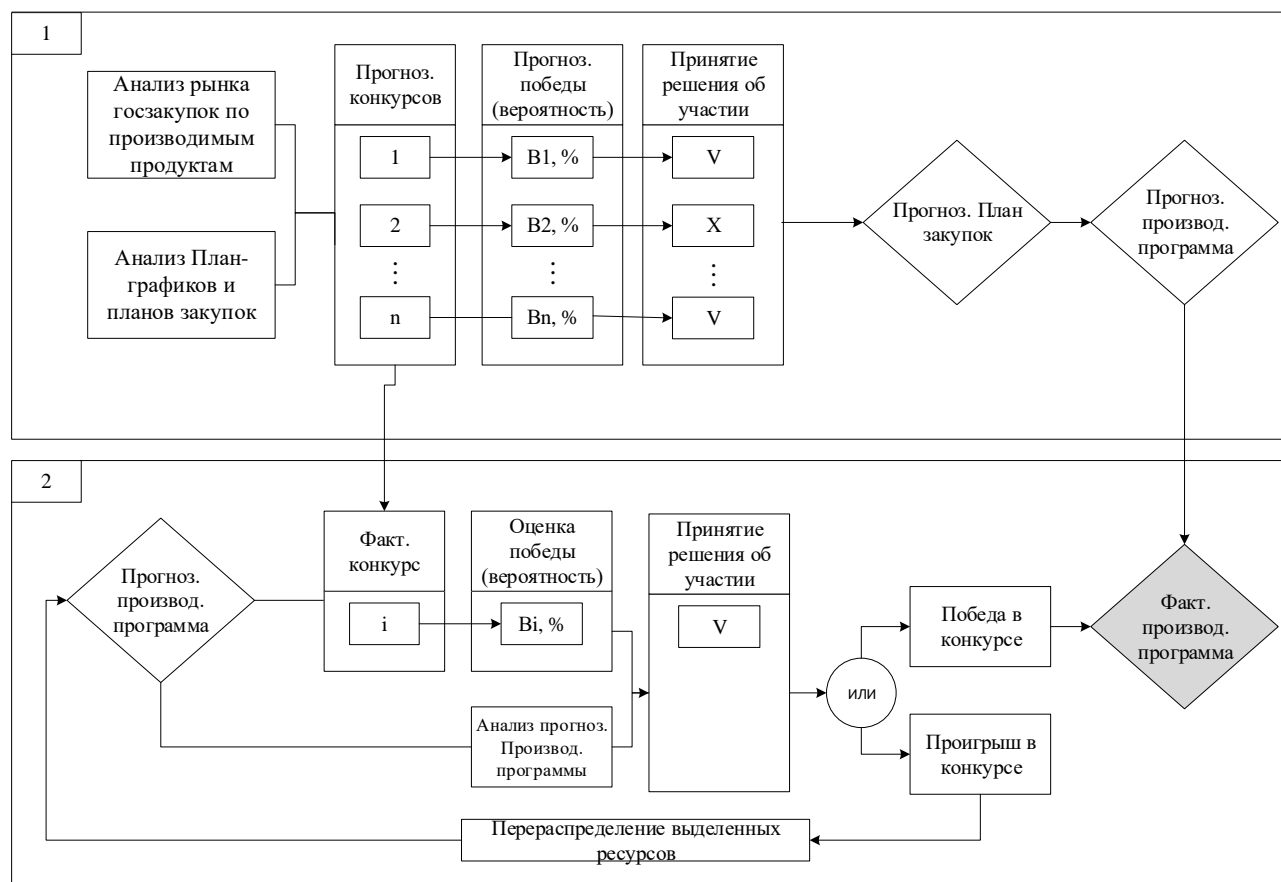


Рис. 1. Этапы разработки гибкой производственной программы на предприятии

Fig. 1. Stages of developing a flexible production program at the enterprise

### Этап 1. Анализ и прогнозирование.

В конце года целесообразно сделать прогноз рынка госзакупок по продукту и составить примерный План закупок на следующий год. Прогноз может формироваться на основании анализа информации за предшествующие годы, на основании изучения планов-графиков закупок, опубликованных в ЕИС, а также на основании информации, полученной любым другим способом. Таким образом, формируется прогнозный перечень конкурсов по продукту по каждому Заказчику. По каждому конкурсу осуществляется предварительная оценка вероятности победы и отбрасываются те конкурсы, участие в которых нецелесообразно или шансы на победу оцениваются как минимальные [16].

На основе полученной информации формируется прогнозный план таких закупок, которые предприятие оценило с высокими шансами на победу для себя, и с учетом этого плана разрабатывается прогнозная производственная программа, целью которой является предварительное планирование производственно-технической и хозяйственно-финансовой деятельности, а также распределение производственных ресурсов.

С учетом того, что Заказчики имеют право корректировать планы-графики и планы закупок, их необходимо анализировать с некой заданной периодичностью и на основе этого корректировать прогнозную производственную программу [17, 18].

### Этап 2. Фактические конкурсы и производственная программа.

После публикации Заказчиком в единой информационной системе объявления о конкурсе необходимо провести анализ условий заявки и на основании прогнозной производственной программы принять решение о возможности участия в конкурсе с учетом достаточности имеющихся ресурсов и возможностей выполнения условий контракта. Если такая возможность имеется, то необходимо оценить вероятность победы в конкурсе на основе имеющейся информации и принять решение о целесообразности участия в конкурсе. После принятия решения необходимо разработать страте-

гию поведения в конкурсе с целью минимизации рисков и повышения шансов на победу.

Если участие в конкурсе завершилось победой для предприятия, на оперативном уровне формируется фактическая производственная программа и продукт запускается в производство. В случае если предприятие ошиблось в прогнозе и не победило в конкурсе, корректируется прогнозная производственная программа с учетом неиспользованных выделенных ресурсов и их возможного перераспределения на другие заказы.

Важно отметить, что планирование охватывает всю деятельность предприятия, следовательно, гибкое производственное планирование должно сопровождаться и гибким планированием хозяйственной и финансовой деятельности: планированием труда, заработной платы, материально-технического обеспечения, развития, вспомогательного и обслуживающего производства, финансов предприятия и т.д. [19].

### Анализ рынка госуслуг

Одним из наиболее важных этапов построения гибкой производственной программы является анализ рынка госуслуг. От глубины анализа рынка госуслуг будет зависеть не только точность прогнозирования закупок, но и возможность разработать модель поведения конкурентов, а также возможность формирования собственной стратегии поведения относительно исследуемого продукта – ценообразование, обеспечение производственными мощностями, обеспечение ресурсами для его производства и т.д.

За счет того, что единая информационная система в сфере госзакупок является единым информационным пространством всех государственных закупок в РФ, она представляет собой обобщенную базу данных, на основе которой имеется возможность получить необходимую информацию для анализа. Следовательно, можно представить схему системы поддержки принятия решений в области определения производственной программы и развития производства, как показано на рис. 2.

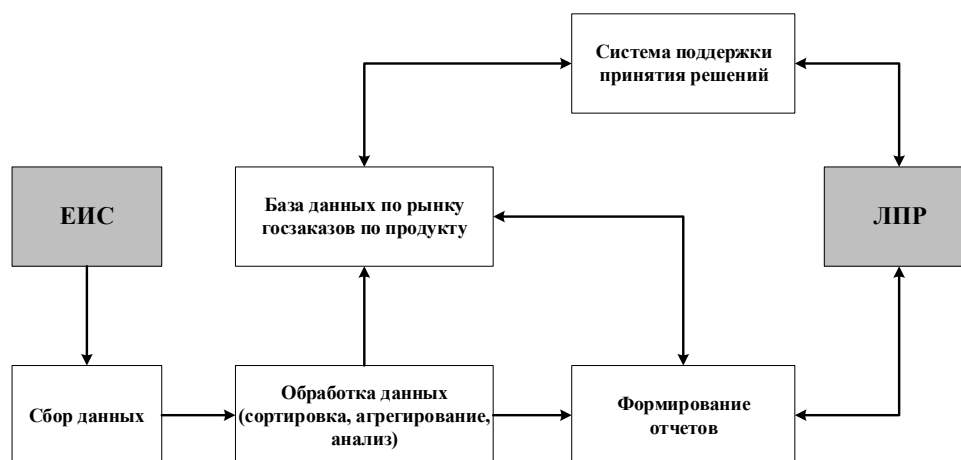


Рис. 2. Схема взаимодействия ЕИС и лица, принимающего решения (ЛПР)

Fig. 2. Chart of the interaction between the integrated information system and the decision maker

Статистическая обработка и представление информации позволит ЛПР не только составить прогнозную производственную программу, но и выработать оптимальную модель поведения в конкурсе с целью увеличения шансов на победу, а также принять другие стратегические решения относительно выпускаемого продукта.

Обобщая и аккумулируя все сведения из ЕИС, производственное предприятие имеет возможность:

1. Изучить спрос на продукт на рынке госуслуг:
  - по каждому Заказчику за интересующий период;
  - суммарный спрос на продукт за интересующий период.

Наблюдения за спросом на продукт на рынке госуслуг за весь период существования ЕИС позволит оценить стабильность или, наоборот, колебания спроса, а в некоторых случаях даже понять, на каком этапе жизненного цикла находится продукт.

2. Выявить всех своих конкурентов на рынке Госуслуг и определить свою долю такого рынка по продукту за период или в динамике, а также оценить поведение этих конкурентов в проведенных конкурсах.

3. Провести анализ других продуктов или услуг, необходимых Заказчику в рамках одного контракта. Данный анализ может позволить принять стратегические решения по диверсификации производства.

4. Оценить цены, условия и сроки поставок товаров в рамках исполнения контрактов, а также условия их финансового обеспечения.

5. Оценить свои производственные возможности по удовлетворению спроса, то есть провести сравнительный анализ спроса на продукт, производственных возможностей самого предприятия и продаваемой им продукции на рынке госзакупок.

Допустим, за рассматриваемый период спрос на данный продукт на рынке госзакупок составил всего  $P$  единиц, предприятием было продано  $\Pi$  единиц продукта, при этом его производственная возможность составляла  $V$  единиц продукта. В данном случае возможны 4 варианта распределения спроса и производственных возможностей, которые представлены на **рис. 3**. На основании проведенного анализа у ЛПР появится возможность выработать стратегию поведения в отношении рассматриваемого продукта [20].

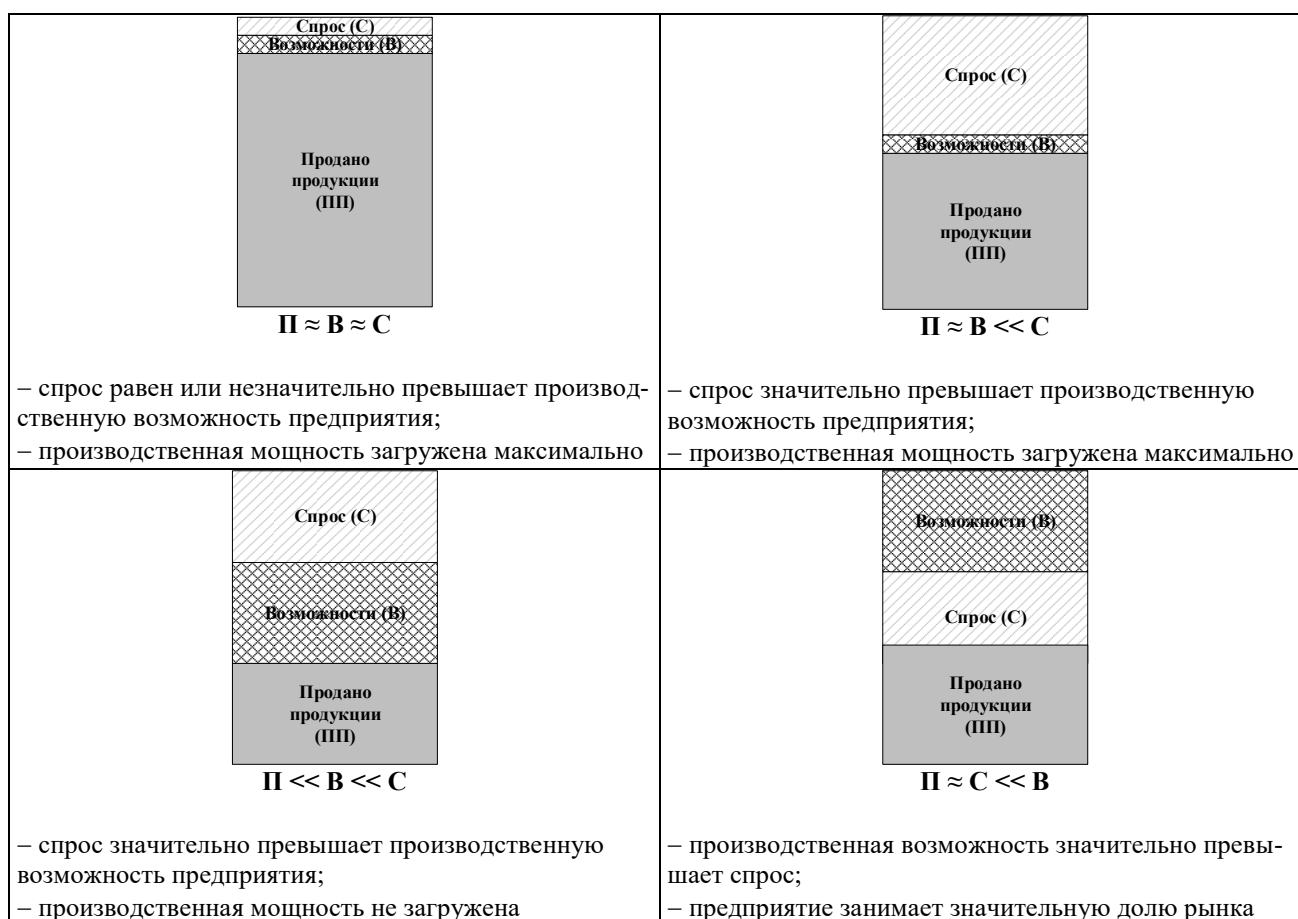


Рис. 3. Возможные варианты сравнения спроса, производственных возможностей и сбыта на рынке госуслуг  
 Fig. 3. Potential options of comparing demand, production facilities and sales on the public services market

Эффективность работы производственного предприятия невозможна без планирования производственной программы. Планирование производства предусматривает выявление и прогнозирование спроса, анализ и оценку имеющихся ресурсов и перспектив развития хозяйственной конъюнктуры. Как следствие, возникает необходимость увязки планирования с анализом рынка и контролем с целью постоянной корректировки показателей производства и сбыта вслед за изменениями на рынке [21]. Система планирования должна обеспечивать соблюдение сроков и объемов поставки продукции заказчикам при минимальном уровне незавершенного производства и затрат.

Большинство производственных предприятий работает с государственными заказчиками или в их интересах в соответствии с требованиями 44-ФЗ и 223-ФЗ [17, 18]. Это означает, что планирование производственной программы становится практически невозможным, так как выбор поставщика происходит в рамках конкурса или аукциона, следовательно, предприятие не может заранее определить, какой объем продукции и на каких условиях оно должно произвести в ближайшее время.

Несмотря на то, что Заказчики по 44-ФЗ и 223-ФЗ проводят только те закупки, которые включены в план-график, они имеют право вносить изменения в эти планы неограниченное количество раз. Поэтому предприятие не может точно прогнозировать общий спрос на рынке госзаказов и заранее разработать свою производственную программу. Для производственных предприятий такое положение вещей – серьезная проблема, так как они не имеют возможности не только планировать свое производство и его равномерную загрузку, но и, как следствие, всю обеспечивающую деятельность – снабжение материальными ресурсами, планово-предупредительный ремонт оборудования, необходимое количество рабочих на производстве, запас готовой продукции на складах и многое другое.

Возникает ситуация, когда предприятие должно быть всегда максимально готово к выполнению любого заказа в любом объеме, то есть быть обеспечено всеми необходимыми ресурсами, в том числе и свободными мощностями в момент размещения новой заявки Заказчиком, при том, что оно не знает, победит ли в объявленном конкурсе, и может только оценить вероятность этой победы. Такая ситуация не позволяет производственному предприятию управлять своей производственной деятельностью с высокой эффективностью и требует разработки новых подходов в планировании производственной программы.

В случае, если предприятие не смогло одержать победу в аукционе, а производство продукта было уже запущено с учетом прогнозного плана, происходит корректировка прогнозной производственной программы с учетом выпущенного объема продукта.

## Заключение

Функции планирования занимают ключевое место при формировании производственной программы предприятия и существенно повышают как качество управления, так и производительность имеющихся на предприятии ресурсов.

Однако имеющиеся внешние условия – неопределенность и необходимость участия в конкурсном механизме госзакупок – обуславливают необходимость разработки системы гибкого планирования, позволяющей адаптироваться под требования рынка, с одной стороны, и под имеющиеся возможности предприятий – с другой.

Рационализация планирования производственной программы промышленного предприятия предопределяет уровень использования основных средств производства, увеличение производительности, рост прибыли и рентабельности, снижение себестоимости и т.д.

Полученная информация в процессе проведения такого исследования и анализа является достаточно ценной для любого производственного предприятия, так как позволяет спланировать свою производственную программу и реализовать ее максимально эффективно в постоянно меняющихся условиях.

## Список источников

1. Моисеенкова Д.А., Смирнов А.Н. Развитие методов производственного планирования и контроля // *Техника средств связи*. 2023. №4(164). С. 72-80.
2. Логунова О.С., Аркулис М.Б. Автоматизированная система оперативного календарного планирования многостадийного производства: математическая модель и программная реализация // *Вестник Череповецкого государственного университета*. 2021. №3. С. 18-37.
3. Анализ подходов к формированию производственной программы промышленного предприятия / Горбачев А.С., Аксенова Т.В., Червяков Д.В., Черных Ю.К. // *Московский экономический журнал*. 2022. Т. 7. №1. С. 338-346.
4. Замбрижская Е.С. Концептуальные основы стратегического управления производственными мощностями // *Вестник Омского университета. Серия «Экономика»*. 2021. Т. 19. №3. С. 50-60.
5. Абрамов А.А., Шершаков И.С. Моделирование процессов производства и реализации продукции на основе использования метода автономного адаптивного управления // *Вестник ТГУ*. 2012. №6. С. 73-77.
6. Боева Л.М., Коврижных О.А. Оперативная корректировка производственных планов с использованием технологий и алгоритмов гибких производственных систем // *Экономика. Информатика*. 2021. Т. 48 (4). С. 802-809.
7. Гусев Е.В., Бородин С.Н. Повышение надежности управленческих решений путем двухэтапного планирования и организации строительного про-

- изводства // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2023. Т. 23. №1. С. 57-64.
8. Чаруйская М.А. Особенности применения на практике методов оперативно-календарного планирования управления производством // Организатор производства. 2017. Т. 25. №2. С. 13-21.
  9. Интегрированная информационная система как инструмент повышения эффективности промышленного предприятия / Симченко О.Л., Чазов Е.Л., Камдина Л.В., Антонов И.А., Вихарев А.Д. // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Экономика. 2023. №2. С. 34-42.
  10. Власов Р.Г., Коробов Ю.С., Кузнецова Е.Ю. Применение технологии машинного обучения для прогнозирования сроков выпуска продукции в условиях неопределенности // Вестник ПНИПУ: Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2021. № 37. С. 104-120.
  11. Аркин П.А., Соловейчик К.А., Аркина К.Г. Реализация методологии оптимизационных подходов при разработке системы бизнес-анализа и прогнозирования для машиностроительного предприятия // Известия Санкт-Петербургского экономического университета. 2017. № 6. С. 57-67.
  12. Федосеев С.А., Вожаков А.В., Гитман М.Б. Управление производством на тактическом уровне планирования в условиях нечеткой исходной информации // Проблемы управления. 2009. № 5. С. 36-43.
  13. Титов В.В., Безмельницын Д.А. Интеграция стратегического планирования и операционной деятельности на предприятии на основе оптимизационного моделирования // Вестник НГУ. Серия: Социально-экономические науки. 2015. Т. 15. Вып.1. С. 123-130.
  14. Долженко Р.А., Долженко С.Б., Малышев Д.С. Методика повышения организационной эффективности предприятия // МИР (Модернизация. Инновации. Развитие). 2023. Т. 14. №1. С. 76-93.
  15. Официальный сайт Единой информационной системы в сфере закупок. URL: <https://zakupki.kontur.ru/0318100067223000163> (дата обращения: 19.02.2024).
  16. Третьякова В.А., Горлачева Е.Н. Разработка методического подхода к оценке вероятности выигрыша конкурса с целью планирования загрузки производственных мощностей // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №1. С. 122-131.
  17. Федеральный закон от 05.04.2013 № 44-ФЗ «О контрактной системе в сфере закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд» [Электронный ресурс]. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_14\\_4624/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_14_4624/) (дата обращения: 20.02.2024).
  18. Федеральный закон от 18.07.2011 № 223-ФЗ «О закупках товаров, работ, услуг отдельными видами юридических лиц» [Электронный ресурс]. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_11\\_6964/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_11_6964/) (дата обращения: 20.02.2024).
  19. Организация и планирование машиностроительного производства (производственный менеджмент): учебник / К.А. Грачева, М.К. Захарова, Л.А. Одинцова и др.; под ред. Ю.В. Скворцова, Л.А. Некрасова. М.: Высш. шк., 2003. 470 с.
  20. Третьякова В.А. Принятие решения об увеличении производственной мощности предприятия на основании анализа рынка госзакупок // XII Чарновские чтения: сборник трудов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, НП «Объединение контроллеров», 2022. С. 88-97.
  21. Организация и планирование производства: учеб. пособие / А.Г. Айрапетова и др.; под ред. А.Г. Айрапетовой и В.В. Корелина. СПб.: Изд-во СПбГУ-ЭФ, 2012. 235 с.

### References

1. Moiseenkova D.A., Smirnov A.N. Development of production planning and control methods. *Tekhnika sredstv svyazi* [Means of Communication Equipment]. 2023;(4(164)):72-80. (In Russ.)
2. Logunova O.A., Arkulis M.B. An automated operational scheduling system for multi-stage production: a mathematical model and software. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Cherepovets State University]. 2021;(3):18-37. (In Russ.)
3. Gorbachev A.S., Aksenova T.V., Chervyakov D.V., Chernykh Yu.K. Analysis of approaches to establishing a production program of an industrial enterprise. *Moskovskiy ekonomicheskiy zhurnal* [Moscow Economic Journal], 2022;7(1):338-346. (In Russ.)
4. Zambrzhitskaya E.S. Conceptual framework for strategic production capacity management. *Vestnik Omskogo universiteta. Seriya «Ekonomika»* [Herald of Omsk University. Series: Economics]. 2021;19(3):50-60. (In Russ.)
5. Abramov A.A., Shershakov I.S. Simulation of production process and sales of products using an autonomous adaptive control method. *Vestnik TGU* [Bulletin of Tomsk State University]. 2012;(6):73-77. (In Russ.)
6. Boeva L.M., Kovrizhnykh O.A. Prompt adjustment of production plans using technologies and algorithms of flexible production systems. *Ekonomika. Informatika* [Economics. Information Technology]. 2021;48(4):802-809. (In Russ.)
7. Gusev E.V., Borodin S.N. Increasing reliability of managerial decisions by two-stage planning and organizing construction. *Vestnik YuUrGU. Seriya «Stroitelstvo i arkhitektura»* [Bulletin of South Ural State University. Construction and Architecture]. 2023;23(1):57-64. (In Russ.)
8. Charuyskaya M.A. Features of applying in practice methods of current calendar planning for industrial



- process control. *Organizator proizvodstva* [Organizer of Production]. 2017;25(2):13-21. (In Russ.)
9. Simchenko O.L., Chazov E.L., Kamdina L.V., Antonov I.A., Vikharev A.D. An integrated information system as a tool for increasing efficiency of an industrial enterprise. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Ekonomika* [Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Economics]. 2023;(2):34-42. (In Russ.)
  10. Vlasov R.G., Korobov Yu.S., Kuznetsova E.Yu. Applying machine learning technology to predict the timing of production under uncertainty. *Vestnik PNIPU: Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya* [Bulletin of Perm National Research Polytechnic University: Electrical Engineering, Information Technology, Control Systems]. 2021;(37):104-120. (In Russ.)
  11. Arkin P.A., Soloveychik K.A., Arkina K.G. Implementation of the methodology of optimization approaches in developing the system of business analysis and forecasting for a machine-building enterprise. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo ekonomicheskogo universiteta* [News of Saint Petersburg State University of Economics]. 2017;(6):57-67. (In Russ.)
  12. Fedoseev S.A., Vozhakov A.V., Gitman M.B. Production control at a tactical level of planning in conditions of fuzzy original information. *Problemy upravleniya* [Control Sciences]. 2009;(5):36-43. (In Russ.)
  13. Titov V.V., Bezmelnitsyn D.A. Integration of strategic planning and operations at the enterprise using optimization modeling. *Vestnik NGU. Seriya: Sotsialno-ekonomicheskie nauki* [Bulletin of Novosibirsk State University. Series: Social and Economics Sciences]. 2015;15(1):123-130. (In Russ.)
  14. Dolzhenko R.A., Dolzhenko S.B., Malyshev D.S. The methodology for increasing organizational efficiency of the enterprise. *MIR (Modernizatsiya. Innovatsii. Razvitie)* [MIR (Modernization. Innovation. Development)]. 2023;14(1):76-93. (In Russ.)
  15. Official website of the Unified Information System for Procurement. Available at: <https://zakupki.kontur.ru/0318100067223000163> (Accessed on February 19, 2024).
  16. Tretyakova V.A., Gorlacheva E.N. The elaboration of a methodological approach to estimating the probability of winning a competition to plant production capacity utilization. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024;22(1):122-131. (In Russ.)
  17. Federal Law dated April 05, 2013 No. 44-FZ "On a contracting system for procurement of goods, work, services to meet the public and municipal demands". Available at: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_144624/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_144624/) (Accessed on February 20, 2024).
  18. Federal Law dated July 18, 2011 No. 223-FZ "On procurement of goods, work, services by individual types of legal entities". Available at: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_116964/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_116964/) (Accessed on February 20, 2024).
  19. Gracheva K.A., Zakharova M.K., Odintsova L.A. et al. *Organizatsiya i planirovanie mashinostroitel'nogo proizvodstva (proizvodstvennyi menedzhment): uchebnik* [Organizing and planning machine building (production management): textbook]. Skvortsov Yu.V., Nekrasova L.A. (Ed.). Moscow: Vysshaya shkola, 2003, 470 p. (In Russ.)
  20. Tretyakova V.A. Making decisions on increasing production capacity of the plant based on the analysis of the state procurement market. *XII Charnovskie chteniya: sbornik trudov* [The 12<sup>th</sup> Charnovsky Readings: Proceedings]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, Scientific Enterprise Association of Controllers, 2022, pp. 88-97. (In Russ.)
  21. Ayrapetova A.G. et al. *Organizatsiya i planirovanie proizvodstva: ucheb. posobie* [Organizing and planning production: study guide]. Ayrapetova A.G., Korelin V.V. Saint Petersburg: Saint Petersburg State University of Economics, 2012, 235 p. (In Russ.)

Поступила 14.03.2024; принята к публикации 18.04.2024; опубликована 30.09.2024  
Submitted 14/03/2024; revised 18/04/2024; published 30/09/2024

**Третьякова Виктория Александровна** – кандидат технических наук, доцент,  
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.  
Email: tva@bmstu.ru. ORCID 0009-0007-7812-0845

**Горлачева Евгения Николаевна** – доктор экономических наук, доцент,  
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.  
Email: egorlacheva@bmstu.ru. ORCID 0000-0001-6290-8557

**Viktoriya A. Tretyakova** – PhD (Eng.), Associate Professor,  
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia.  
Email: tva@bmstu.ru. ORCID 0009-0007-7812-0845

**Evgeniya N.Gorlacheva** – DrSc (Econ.), Associate Professor,  
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia.  
Email: egorlacheva@bmstu.ru. ORCID 0000-0001-6290-8557

# МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

## MODELLING OF METALLURGICAL PROCESSES

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)  
УДК 621.77  
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-3-170-177



### ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛЕМЕДНОЙ ПРОВОЛОКИ ПРИ ВОЛОЧЕНИИ В МОНОЛИТНОЙ ВОЛОКЕ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Терентьев Д.В., Усанов М.Ю., Шеметова Е.С., Платов С.И., Харитонов В.А.

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

**Аннотация.** С применением адаптированной конечно-элементной модели процесса волочения биметаллической проволоки в монолитной волоке проведено аналитическое исследование влияния степени единичной деформации и рабочего угла волоки на изменение напряженно-деформированного состояния сталемедной проволоки в очаге деформации. В качестве основного инструмента исследования выбрана программа моделирования Deform-3d. Исходные данные для моделирования следующие: диаметр сталемедной заготовки 6,0 мм – толщина оболочки 0,5 мм, материал медь М1, сердечник диаметром 5,0 мм, материал сталь марки 50. Сердечник и оболочка принимались как пластические тела. Коэффициент трения между волокой и оболочкой постоянный, по закону Кулона равен 0,05. Взаимодействие оболочки и сердечника в свойствах инструмента Inter-ObjectDataDefinition задавалось как Stickingcondition, и при этом устанавливался параметр Separable для контроля возможного отслоения. В Deform-3d просчитано 9 вариантов волочения сталемедной проволоки диаметром 6,0 мм в волоках при значениях углов  $2\alpha$ , равных 12, 18 и 24 град, и вытяжках  $\mu$ , равных 1,10, 1,20 и 1,30. Определяли напряжения волочения, среднее нормальное давление, поля распределения коэффициента жесткости Смирнова-Аляева и Лоде-Надаи, изменение геометрических размеров оболочки и сердечника. Обоснованы деформационные режимы, обеспечивающие максимальную устойчивость процесса волочения. Показано, что предложенная модель учитывает все ранее полученные методом координатной сетки закономерности, но при этом значительно ускоряет и упрощает процесс расчета деформированного состояния, позволяет получать значения действующих на проволоку напряжений и проектировать фактический очаг деформации.

**Ключевые слова:** волочение, сталемедная проволока, моделирование, протяжка, угол волоки, обжатие, напряжения

© Терентьев Д.В., Усанов М.Ю., Шеметова Е.С., Платов С.И., Харитонов В.А., 2024

#### Для цитирования

Оценка напряженно-деформированного состояния сталемедной проволоки при волочении в монолитной волоке на основе моделирования / Терентьев Д.В., Усанов М.Ю., Шеметова Е.С., Платов С.И., Харитонов В.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №3. С. 170-177. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-170-177>



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

## ASSESSING THE STRESS AND STRAIN STATE OF STEEL-COPPER WIRE BASED ON MODELING OF DRAWING IN A MONOLITHIC DIE

Terentev D.V., Usanov M.Yu., Shemetova E.S., Platov S.I., Kharitonov V.A.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

**Abstract.** An adapted finite element model of the process of drawing bimetallic wire in a monolithic die was used to conduct an analytical study on the influence of unit strain and the die reduction angle on the change in the stress and strain state of steel-copper wire in the deformation zone. DEFORM-3D simulation software was chosen as a main research tool. The initial data for modeling were chosen as follows: steel-copper workpiece diameter was 6.0 mm, shell thickness was 0.5 mm, the material was copper M1, core diameter was 5.0 mm and material was steel50. The core and the shell were taken as plastic bodies. The coefficient of friction between the die and the shell is constant, namely 0.05 according to Coulomb's law. The shell-core interaction in the Inter-Object Data Definition tool properties was set to Sticking Condition, and the Separable parameter was set to control possible delamination. DEFORM-3D calculates 9 options for drawing steel-copper wire with a diameter of 6.0 mm in dies at angles  $2\alpha$  of 12, 18 and 24 degrees and drawing ratio  $\mu$  of 1.10, 1.20 and 1.30. The authors calculated drawing stresses, average normal pressure, Smirnov-Alyayev and Lode-Nadai stiffness coefficient distribution fields, and changes in the geometric dimensions of the shell and the core. The paper presents a rationale for deformation modes ensuring maximum stability of the drawing process. It has been shown that the proposed model factors into all the patterns previously determined by the coordinate grid method, but at the same time significantly speeds up and simplifies the process of calculating the strain state, providing the values of stresses acting on wire and design of the actual deformation zone.

**Keywords:** drawing, steel-copper wire, modeling, drawing, die reduction angle, reduction, stresses

### For citation

Terentyev D.V., Usanov M.Yu., Shemetova E.S., Platov S.I., Kharitonov V.A. Assessing the Stress and Strain State of Steel-Copper Wire Based on Modeling of Drawing in a Monolithic Die. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 3, pp. 170-177. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-170-177>

### Введение

Сталемедная проволока позволяет сочетать высокий уровень механических свойств сердечника с высокой электропроводностью, коррозионной стойкостью, жаростойкостью, адгезионной способностью и широко используется в воздушных линиях связи, шахтных канатах, плетеных и тканых сетках и т.д. Ее востребованность в различных отраслях народного хозяйства постоянно возрастает, как и требования к ее качеству и эффективности производства. В общем случае сталемедная проволока относится к классу композитных материалов.

Основным способом изготовления сталемедной проволоки является волочение в монолитных волоках. Наряду с факторами, влияющими на режимы волочения стальной монометаллической проволоки, устойчивость процесса волочения биметаллической проволоки зависит от количественного соотношения и свойств составляющих компонентов, а также прочности их соединения на границе «оболочка-сердечник». Деформированное состояние сталемедной проволоки формируется по схеме МТМ (твердый сердечник – мягкая оболочка). При волочении происходит изменение отношения прочности сердечника и оболочки, значительно изменяются их пластические свойства. В результате этого возникает неравномер-

ность деформации составляющих биметаллической проволоки, что изменяет прочность их соединения и приводит к потере устойчивости пластической деформации материала оболочки или сердечника [1-5].

Обычно это связано с превышением допустимого значения усилия волочения. При этом наблюдается внеконтактная деформация, приводящая к вспучиванию лакирующей оболочки перед и после волоки, вызывает ее отслоение, разнотолщинность или нарушение сплошности покрытия [1-3].

Возникающая неоднородность деформации определяется величиной обжатия за проход, полууглом рабочего конуса волоки, прочностью связи граничных поверхностей сердечника, соотношением прочностных свойств сердечника и оболочки, условиями трения на границе волока-оболочка и отношением размеров сечения сердечника и оболочки. Неоднородность деформации при волочении из-за деформации сдвига устранить невозможно, но уменьшить ее размеры можно путем подбора подходящих параметров геометрии очага деформации и создания идеальных условий трения [1].

Кроме того, волочение характеризуется неблагоприятной разноименной схемой главных напряжений с преобладанием растягивающих напряжений в очаге деформации, особенно на выходе проволоки из

него. Растягивающие напряжения возникают также на контакте оболочка-волокна из-за сдерживающего действия силы трения, которая определяется величиной коэффициента трения и силы нормального давления.

Таким образом, устойчивость процесса волочения биметаллической проволоки во многом определяется напряженно-деформированным состоянием (НДС) проволоки как в очаге деформации, так и на входе и выходе из него. В связи со сложностью его определения экспериментальным путем большое практическое и теоретическое значение имеют математические и компьютерные модели процессов соединения разнородных материалов, позволяющие изучить влияние показателей НДС на прочность соединения в идеализированных условиях.

Целью данной работы является изучение НДС при волочении сталемедной проволоки в монолитных конических волокнах.

### Материалы и методы исследования

Для анализа напряженно-деформированного состояния биметаллической проволоки за основу взяли разработанную в МГТУ им. Г.И. Носова модель волочения монометаллической проволоки [6-8].

Объектом исследования являлся процесс волочения сталемедной проволоки. В качестве основного инструмента исследования выбрана программа моделирования Deform-3d. Исходные данные для моделирования: диаметр заготовки 6,0 мм – толщина оболочки 0,5 мм, материал медь М1, сердечник диаметром 5,0 мм, материал сталь марки 50. В качестве кривой упрочнения стали марки 50 принята кривая упрочнения стали А533В из базы данных Deform-3d. Кривая упрочнения для меди взята из справочника [9]. Сердечник и оболочка принимались как пластические тела. Длина заготовки 40 мм. Коэффициент трения между волоком и оболочкой постоянный, по закону Кулона равен 0,05. Взаимодействие оболочки и сердечника в свойствах инструмента Inter-ObjectDataDefinition задавалось как Stickingcondition, и при этом устанавливался параметр Separable для контроля возможного отслоения. Скорость волочения 1 м/с. Геометрия волокна по ГОСТ 9453-75. При моделировании рассматривалась одна протяжка и менялись рабочие углы волока и вытяжка. Рабочие углы

Таблица 1. Усилие волочения при волочении сталемедной проволоки

Table 1. Drawing force when drawing steel-copper wire

	Рабочий полуугол волокна		
	6°	9°	12°
Вытяжка 1,10	Остановка моделирования	1,74 кН	1,91 кН
Вытяжка 1,20	2,12 кН	2,22 кН	2,28 кН
Вытяжка 1,30	Остановка моделирования	2,56 кН	2,77 кН

волок принимались  $2\alpha = 12^\circ$ ,  $2\alpha = 18^\circ$ , и  $2\alpha = 24^\circ$ , а вытяжка 1,10, 1,20 и 1,30. Таким образом, чередуя для каждого угла различные вытяжки, было выполнено 9 расчетных экспериментов в Deform-3d. Сетка для деформируемых объектов задана в виде четырехгранника (или тетраэдра).

Поля распределения коэффициента жесткости схемы Смирнова-Аляева определяли с помощью дополнительной подпрограммы для Deform-3d [6-8]:

$$\eta = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i},$$

где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные напряжения;

$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$  – интенсивность нормальных напряжений.

Поля распределения показателя Лоде-Надаи определяли также с помощью дополнительной подпрограммы по формуле

$$\mu_\sigma = 2 \cdot \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1.$$

Совокупность параметров  $\eta$  и  $\mu_\sigma$  характеризует напряженное состояние при пластической деформации. Кроме того, являясь безразмерными, они позволяют сопоставлять напряженное состояние материалов с различным уровнем прочностных свойств. Значения показателя  $\mu_\sigma$  изменяются от -1 до 1, причем  $\mu_\sigma = -1$  соответствует линейному растяжению,  $\mu_\sigma = 1$  соответствует линейному сжатию,  $\mu_\sigma = 0$  соответствует чистому сдвигу. Показатель  $\mu_\sigma$  определяет схему девиатора. При девиаторных схемах растяжения  $\mu_\sigma$  изменяется в пределах  $-1 \leq \mu_\sigma \leq 0$ , при девиаторных схемах сжатия  $\mu_\sigma$  изменяется в пределах  $0 \leq \mu_\sigma \leq 1$ , наконец, при девиаторной схеме сдвига  $\mu_\sigma = 0$ .

### Полученные результаты и их обсуждение

В результате моделирования были получены значения усилия волочения (табл. 1), оценено распределение среднего нормального давления на поверхности оболочки в очаге деформации (табл. 2) и получены поля распределения коэффициента жесткости Смирнова-Аляева и Лоде-Надаи (табл. 3-5).

Таблица 2. Нормальное давление в очаге деформации  
Table 2. Normal pressure in the deformation zone

	Рабочий полуугол волокни		
	6°	9°	12°
Вытяжка 1,10	Остановка моделирования	-432,0 МПа	-494,0 МПа
Вытяжка 1,20	-332,0 МПа	-391,0 МПа	-451,0 МПа
Вытяжка 1,30	Остановка моделирования	-368,0 МПа	-410,0 МПа

Таблица 3. Напряженное состояние проволоки и оболочки при рабочем полуугле волокни 6°  
Table 3. Stress state of the wire and the shell at a die reduction semi-angle of 6°

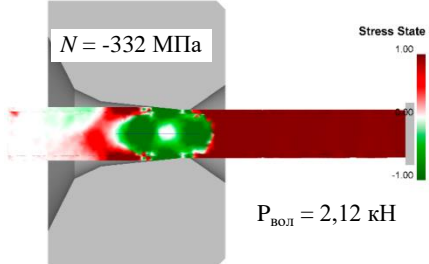
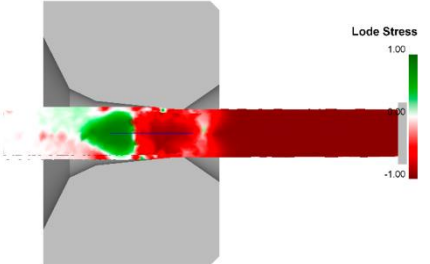
	Смирнов-Аляев	Лоде-Надаи
6°, вытяжка 1,10	Остановка моделирования	Остановка моделирования
6°, вытяжка 1,20		
6°, вытяжка 1,30	Остановка моделирования	Остановка моделирования

Таблица 4. Напряженное состояние проволоки и оболочки при рабочем полуугле волокни 9°  
Table 4. Stress state of the wire and the shell at a die reduction semi-angle of 9°

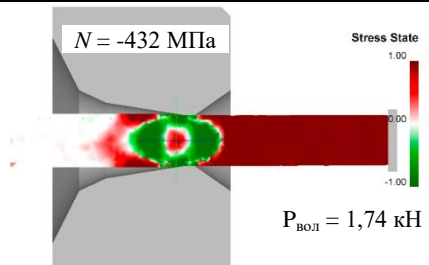
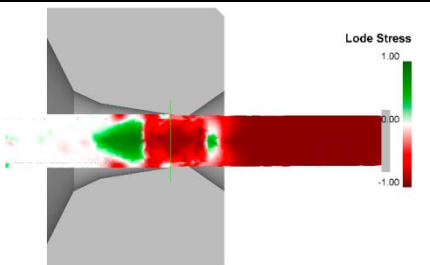
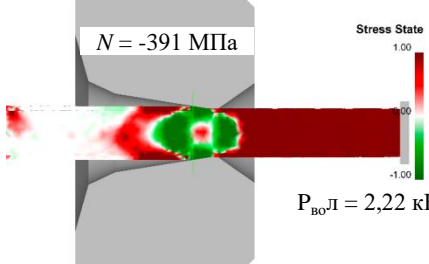
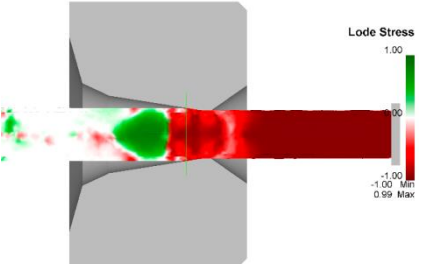
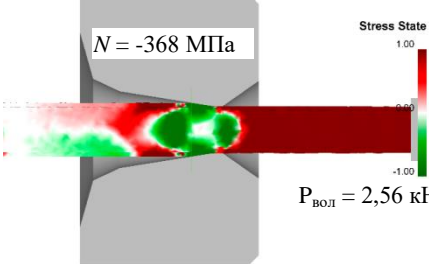
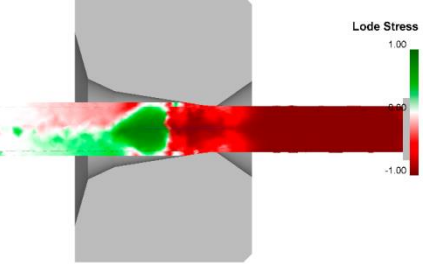
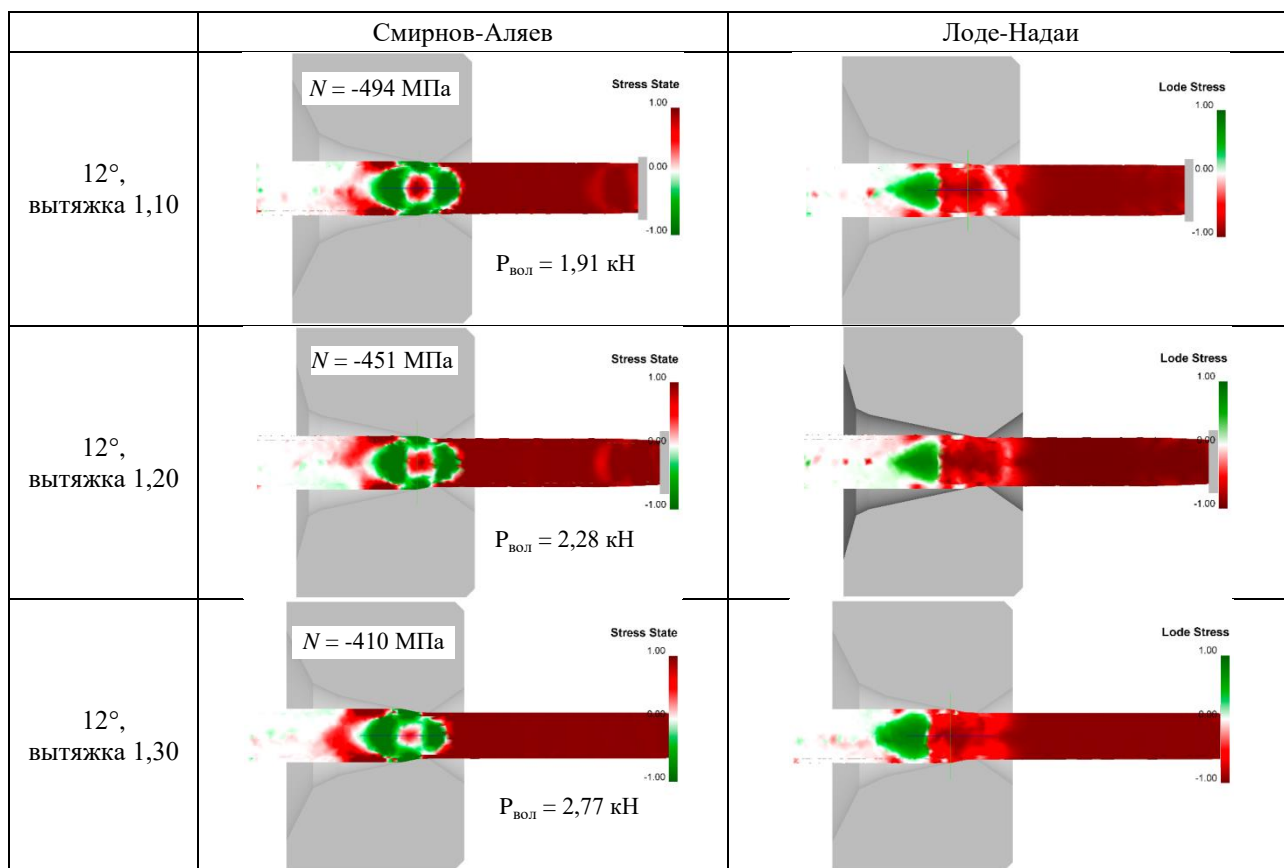
	Смирнов-Аляев	Лоде-Надаи
9°, вытяжка 1,10		
9°, вытяжка 1,20		
9°, вытяжка 1,30		

Таблица 5. Напряженное состояние проволоки и оболочки при рабочем полуугле волокни 12°  
 Table 5. Stress state of the wire and the shell at a die reduction semi-angle of 12°



Процесс моделирования останавливался при значении рабочего полуугла 6° и вытяжках 1,10 и 1,30. Увеличение рабочего полуугла волокни до 9° делает процесс волочения стабильным. При малой вытяжке – 1,10 на оси проволоки в очаге деформации действуют растягивающие напряжения, так как коэффициент Смирнова-Аляева равен 1, при этом на поверхности оболочки нормальное давление -432 МПа. Увеличение вытяжки до 1,20 приводит к снижению растягивающих напряжений на оси проволоки и нормального давления на поверхности (-391 МПа), одновременно с этим идет увеличение значения усилия волочения (2,22 кН). При увеличении вытяжки до 1,30 тенденция сохраняется, при этом на оси проволоки растягивающие напряжения переходят в сдвиговые (коэффициент Смирнова-Аляева равен 0).

Увеличение рабочего полуугла волокни (до 12°) приводит к сокращению области растягивающих напряжений в оболочке до входа в очаг деформации. При этом на оси проволоки действует схема с растягивающими напряжениями при вытяжках 1,10, 1,20 и 1,30.

Изучение очагов деформации позволило установить некоторые особенности процесса волочения сталемедной проволоки. На продольном разрезе в Deform-3d были измерены основные геометрические размеры сердечника и оболочки. Установлено, что

оболочка имеет разную толщину, в зависимости от обжатия. С увеличением обжатия толщина оболочки уменьшается. Также установлено, что значение полуугла волокни не соответствует полууглу, при котором деформируется сердечник. На рисунке показано, что полуугол волокни 12°, но, проходя через очаг деформации, оболочка оказывает свое действие, и для сердечника полуугол становится меньше 12°. Так, при вытяжке 1,30 и полуугле волокни 12° на сердечник действует оболочка с полууглом 10,45°. Чем меньше обжатие, тем меньше полуугол действует на сердечник. Значения полууглов, действующих на сердечник, и толщина оболочки на выходе из очага деформации приведены в табл. 6.

Этим можно объяснить остановку процесса моделирования при вытяжках 1,10 и 1,30 и рабочем полуугле 6°. Малый полуугол (6°) и малая вытяжка (1,10) приводят к тому, что очаг деформации становится очень коротким, а значение полуугла в зоне контакта металл-оболочка равен 3,5°. При данных условиях практически все усилие волочения воспринимает оболочка, а сердечник практически не деформируется, что приводит к тому, что волокни стремится «содрачь» оболочку с проволоки. Происходит нарушение ее сплошности и процесс моделирования останавливается.

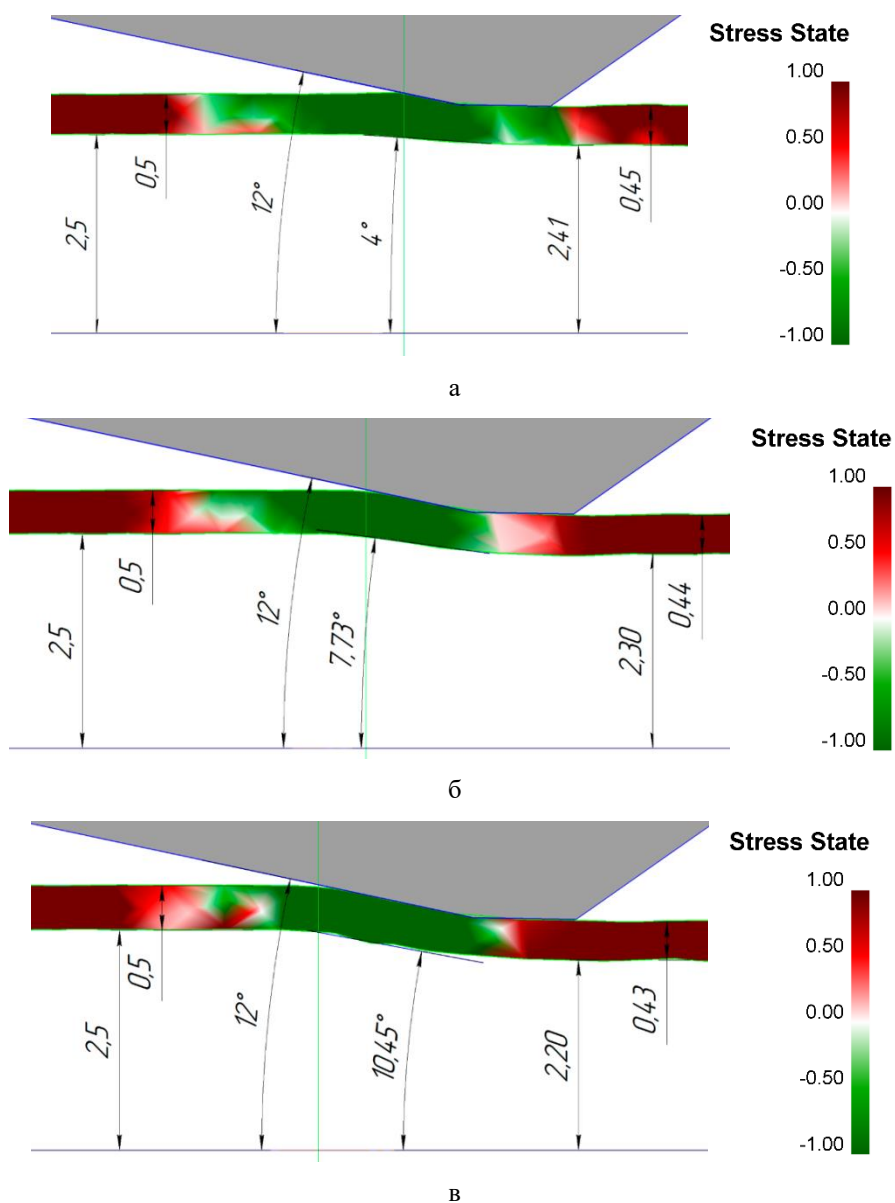


Рисунок. Напряженное состояние оболочки в очаге деформации и геометрические параметры (полуугол волоки 12°): а – вытяжка 1,10; б – вытяжка 1,20; в – вытяжка 1,30

Figure. Stress state of the shell in the deformation zone and geometric parameters (a die reduction semi-angle of 12°): a is a drawing ratio of 1.10; б is a drawing ratio of 1.20; в is a drawing ratio of 1.30

Таблица 6. Геометрические характеристики оболочки и сердечника

Table 6. Geometric characteristics of the shell and the core

Вытяжка	Полуугол волоки, град	Угол на границе сердечника и оболочки, град	Толщина оболочки после волочения, мм	Соотношение толщин оболочки (после волочения к исходной толщине)
1,10	6	3,5	–	–
1,20	6	5,6	0,47	0,94
1,30	6	4,8	–	–
1,10	9	3,6	0,47	0,95
1,20	9	7,9	0,46	0,91
1,30	9	8,9	0,43	0,85
1,10	12	4,0	0,45	0,90
1,20	12	7,7	0,44	0,88
1,30	12	10,45	0,43	0,86

При вытяжке 1,30 полуугол в зоне контакта металл-оболочка, действующий на сердечник, равен 5,8°. Сочетание малого угла и большой вытяжки способствует росту усилия волочения, коэффициент запаса при этом уменьшается и процесс моделирования останавливается.

Стоит отметить, что при полуугле 6° и вытяжке 1,20 процесс волочения в Deform-3d считается без каких-либо затруднений. В данном случае полуугол, действующий на сердечник, равен 5,6°.

Полученные при моделировании зависимости формоизменения оболочки и сердечника соответствуют зависимостям, полученным методом координатных сеток и используемым сегодня в практике [10]. Кроме того, разработанная модель процесса волочения биметаллической проволоки дает возможность более детального изучения очага деформации.

### **Заключение**

Путем уточнения конечно-элементной математической модели волочения стальной проволоки в монолитной волоке получена модель волочения сталемедной проволоки в монолитной волоке.

Проведено компьютерное моделирование изменения напряженно-деформированного состояния сталемедной проволоки при волочении в монолитной волоке в зависимости от значений единичного обжата и рабочего угла волоки. Обоснован выбор рациональных режимов волочения, обеспечивающих высокую устойчивость процесса.

Показано, что разработанная модель обеспечивает реализацию закономерностей волочения биметаллической проволоки, полученных методом координатной сетки и используемых в практике волочения. При этом значительно ускоряется и упрощается процесс расчета, деформированного состояния, обеспечивается числовой расчет напряжений и возможность проектирования фактического очага деформации.

### **Список источников**

1. Битков В.В. Анализ неоднородности деформации при волочении композитных прутков и проволоки // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2010. №8. С. 21-27.
2. Салиханов Д.Р. Исследование напряженно-деформированного состояния на границе между материалами при прокатке слоистого композита // *Черные металлы*. 2023. №9. С. 34-39.
3. Шумилин И.М. Условия устойчивого волочения биметаллической проволоки // *Сталь*. 1977. №12. С. 1124-1125.
4. Шеметова Е.С., Огарков Н.Н. Оценка длины контакта криволинейной волоки с деформируемым материалом с учетом ее упругой деформации // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2010. №2. С. 38-40.

5. Огарков Н.Н., Шеметова Е.С. Определение осевых напряжений в материале оболочки на выходе из волоки методом верхней оценки // *Современные методы конструирования и технологии металлургического машиностроения: междунар. сб. науч. тр. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова*. 2015. С. 9-15.
6. Харитонов В.А., Усанов М.Ю. Анализ процесса волочения в монолитной волоке при моделировании в программном комплексе Deform-3d [Электронный ресурс]: учеб. пособие / ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Электрон. текстовые дан. (172 Мб). Магнитогорск: ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2018.
7. Методика совершенствования и проектирования маршрутов волочения проволоки / М.Ю. Усанов, В.А. Харитонов, Л.Э. Пыхов, Н.Ю. Сметнева // *Сталь*. 2018. №6. С. 42-43.
8. Харитонов В.А., Усанов М.Ю. Выбор способа волочения углеродистой проволоки // *Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия»*. 2021. Т. 77. №11. С. 1177-1185.
9. Третьяков В.М., Зюзин В.И. Механические свойства сталей и сплавов: Справочник. 2-е изд. М.: Металлургия, 1973. 224 с.
10. Стальная проволока: монография / Х.Н. Белалов, А.А. Клековкин, Н.А. Клековкина, Г.С. Гун, А.Г. Корчунов, М.А. Полякова. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. 689 с.

### **References**

1. Bitkov V.V. Analysis of strain non-uniformity in drawing composite rods and wire. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii* [Blanking Production in Mechanical Engineering]. 2010;(8):21-27. (In Russ.)
2. Salikhyanov D.R. Investigation of the stress-strain state at the boundary between materials during rolling of a layered composite. *Chernye metally* [Ferrous Metals]. 2023;(9):34-39. (In Russ.)
3. Shumilin I.M. Conditions of steady drawing of bimetalllic wire. *Stal* [Steel]. 1977;(12):1124-1125. (In Russ.)
4. Shemetova E.S., Ogarkov N.N. Assessing length of contact between a curved die and the deformed material factoring into elastic strain. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2010;(2):38-40. (In Russ.)
5. Ogarkov N.N., Shemetova E.S. An upper-bound method used to determine axial stresses in the shell material exiting the die. *Sovremennyye metody konstruirovaniya i tekhnologii metallurgicheskogo mashinostroeniya: mezhdunar. sb. nauch. tr.* [Modern methods of design and technologies of metallurgical



- mechanical engineering: international collection of reports]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2015, pp. 9-15. (In Russ.)
6. Kharitonov V.A., Usanov M.Yu. *Analiz protsessy volocheniya v monolitnoy voloke pri modelirovaniy v programnom komplekse Deform-3d: ucheb. posobie* [Analyzing a process of drawing in a monolithic die, using simulation in DEFORM-3D software suite: study guide]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2018. (In Russ.)
  7. Usanov M.Yu., Kharitonov V.A., Pykhov L.E., Smetneva N.Yu. Techniques used to improve and design wire drawing routes. *Stal* [Steel]. 2018;(6):42-43. (In Russ.)
  8. Kharitonov V.A., Usanov M.Yu. Choosing a method for carbon steel wire drawing. *Byulleten nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii «Chernaya metallurgiya»* [Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information Ferrous Metallurgy]. 2021;77(11):1177-1185. (In Russ.)
  9. Tretyakov V.M., Zyuzin V.I. *Mekhanicheskie svoystva staley i splavov: Spravochnik* [Mechanical properties of steels and alloys: Handbook]. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow: Metallurgiya, 1973, 224 p. (In Russ.)
  10. Belalov Kh.N., Klekovkin A.A., Klekovkina N.A., Gun G.S., Korchunov A.G., Polyakova M.A. *Stalnaya provoloka: monografiya* [Steel wire: monograph]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2011, 689 p. (In Russ.)

Поступила 20.12.2023; принята к публикации 26.01.2024; опубликована 30.09.2024  
Submitted 20/12/2023; revised 26/01/2024; published 30/09/2024

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

**Усанов Михаил Юрьевич** – кандидат технических наук, доцент,  
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: barracuda\_m@mail.ru. ORCID 0000-0002-5920-3449

**Шеметова Елена Сергеевна** – старший преподаватель,  
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: hellensh88@list.ru. ORCID 0000-0002-3412-0401

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

**Харитонов Вениамин Александрович** – кандидат технических наук, профессор,  
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: hva-46@yandex.ru. ORCID 0000-0003-3487-7110

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

**Mikhail Yu. Usanov** – PhD (Eng.), Associate Professor,  
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: barracuda\_m@mail.ru. ORCID 0000-0002-5920-3449

**Elena S. Shemetova** – Senior Lecturer,  
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: hellensh88@list.ru. ORCID 0000-0002-3412-0401

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

**Veniamin A. Kharitonov** – PhD (Eng.), Professor,  
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: hva-46@yandex.ru. ORCID 0000-0003-3487-7110

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)  
УДК 621.771.23  
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-3-178-187



## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОЛСТОЛИСТОВОЙ ПРОКАТКИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА С ВАРИАНТНОСТЬЮ ПРОХОЖДЕНИЯ ПРОЦЕССОВ РАЗУПРОЧНЕНИЯ

Логинов Ю.Н.<sup>1,2</sup>, Непряхин С.О.<sup>1</sup>, Исякаев К.Т.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup> Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

<sup>3</sup> ОАО «Каменск-Уральский металлургический завод», Каменск-Уральский, Россия

**Аннотация.** Актуальность работы обусловлена высокой востребованностью промышленностью проката из алюминиевых сплавов, в особенности после запуска в производство новых мощностей по производству такого проката в России. Целью работы являлось установление различия в напряженно-деформированном состоянии металла в двух вариантах проведения процесса прокатки: с учетом прохождения процесса разупрочнения и без такого учета. Отмечено, что алюминий отличается от других металлов высокой энергией дефекта упаковки, что тормозит развитие процессов рекристаллизации, поэтому прохождение этих процессов в многопроходных схемах обработки металла и его сплавов становится неочевидным. Для анализа использован метод конечных элементов, реализованный в программном модуле DEFORM. Выполнено конечно-разностное моделирование процесса горячей прокатки сляба из алюминиевого сплава. Анализу подвергнуто семь проходов прокатки. На протяжении этих проходов очаг деформации остается высоким. Основное внимание уделено седьмому процессу прокатки, где накопление деформаций должно оказаться наибольшим. Постановка задачи включала в себя два варианта. Один вариант основан на гипотезе сохранения уровня нагартовки от предыдущих проходов. Второй вариант подразумевал прохождение процесса разупрочнения в паузах между проходами. Показано распределение деформаций и напряжений в очаге деформации при прокатке. Построены эпюры распределения контактных давлений по длине очага деформации. Сделан вывод о большей неравномерности распределения деформации в первом варианте расчетов, такой вывод обладает новизной. Выполнено сравнение с производственными данными системы мониторинга. Показана лучшая сходимости второго варианта расчетов, но сделано примечание, что это касается исследованной схемы деформации.

**Ключевые слова:** прокатка, алюминиевый сплав, механические напряжения, пластическая деформация, моделирование, рекристаллизация

© Логинов Ю.Н., Непряхин С.О., Исякаев К.Т., 2024

### Для цитирования

Логинов Ю.Н., Непряхин С.О., Исякаев К.Т. Моделирование толстолистовой прокатки алюминиевого сплава с вариантностью прохождения процессов разупрочнения // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №3. С. 178-187. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-178-187>



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

# SIMULATION OF PLATE ROLLING OF THE ALUMINUM ALLOY WITH OPTIONS OF SOFTENING PROCESSES

Loginov Yu.N.<sup>1,2</sup>, Nepryakhin S.O.<sup>1</sup>, Isyakaev K.T.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

<sup>2</sup> Mikheev Institute of Metal Physics, the Ural Branch, the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

<sup>3</sup> OJSC Kamensk-Uralsky Metallurgical Works, Kamensk-Uralsky, Russia

**Abstract.** The research is relevant due to a high demand for rolled aluminum alloys by the industry, especially after launching new facilities for the production of such rolled products in Russia. The research was aimed at establishing the difference in the stress and strain state of the metal in two options of the rolling process: factoring and no factoring into the softening process. It has been noted that aluminum differs from other metals in its high stacking fault energy, inhibiting the development of recrystallization processes; therefore, these processes in multi-pass forming process flow charts for the metal and its alloys becomes unobvious. To analyze the results, the authors used the finite element method implemented in the DEFORM software module. The article presents the conducted finite-difference modeling of the hot rolling process of an aluminum alloy slab. Seven rolling passes were analyzed. Throughout these passes, the deformation zone remains high. Main attention is paid to the seventh rolling process, where the accumulation of deformations should be the greatest. The problem statement included two options. One option is based on the hypothesis of maintaining the level of work hardening from previous passes. The second option involved the softening process in pauses between passes. The article describes the distribution of strains and stresses in the deformation zone during rolling. The authors prepared diagrams of the distribution of contact pressure along the length of the deformation zone. The strain distribution in the first option of the calculations was concluded to be more uneven; this conclusion is novel. The results were compared with the production data of the monitoring system. The second option of the calculations showed the best convergence, but a note was made that this applied to the deformation scheme under study.

**Keywords:** rolling, aluminum alloy, mechanical stress, plastic deformation, simulation, recrystallization

## For citation

Loginov Yu.N., Nepryakhin S.O., Isyakaev K.T. Simulation of Plate Rolling of the Aluminum Alloy with Options of Softening Processes. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 3, pp. 178-187. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-178-187>

## Введение

Применение алюминиевых сплавов в авиации и других отраслях техники обусловлено малой плотностью основного металла и возможностью получить достаточно прочные детали. Самым производительным процессом получения полуфабрикатов, в том числе и из алюминиевых сплавов, является прокатка. Для получения листов и плит используется метод прокатки валками с гладкой поверхностью [1, 2]. После отливки слябовых заготовок они подлежат прокатке в нагретом состоянии. Для процесса слябовой прокатки в черной металлургии будет очевидно считать, что это процесс горячей деформации [3]. Но для обработки алюминиевых сплавов проблемой является, считать ли процесс такой прокатки горячим, потому что по определению горячей обработкой металла является его формоизменение при температурах выше температуры рекристаллизации [4].

Алюминий отличается от других металлов высокой энергией дефекта упаковки – порядка 170 МДж/м<sup>2</sup>, а для аустенитной стали это порядка 20 МДж/м<sup>2</sup>, и высокой гомологической температурой рекристаллизации [5], поэтому ряд процессов обработки алюминиевых сплавов нацелен на то, чтобы

после обработки при высокой температуре сохранить уровень нагартовки. Например, на это нацелено большинство процессов прессования продукции из алюминиевых сплавов [6-8], но учитывать явление приходится и при прокатке, для чего предлагалось использовать даже приемы булевой алгебры [9]. Особенностью процессов обработки давлением алюминиевых сплавов также является возможность проявления отрицательной чувствительности сопротивления деформации алюминиевых сплавов к скорости деформации вследствие динамического деформационного старения [10].

Авторами статьи [11] после экспериментальных исследований состояния металла между проходами горячей прокатки сплава 6016 (система Al-Mg-Si) сделаны выводы о недостаточности условий для протекания процессов рекристаллизации. В статье [12] установлено, например, что скорость рекристаллизации для алюминиевого сплава 5182 (система Al-Mg) даже в большей степени зависит от скорости деформации, чем от температуры. В статье [13] исследованы условия последовательности перехода от динамического возврата к рекристаллизации для сплава 5083 (система Al-Mg), правда диапазон скоростей деформации оказался небольшим: от 0,001 до 0,01 с<sup>-1</sup>. Меж-

ду тем скорость деформации при листовой прокатке алюминия может изменяться на несколько порядков, в том числе из-за локализации очага деформации в приконтактных зонах [14]. При этом также установлено [15], что если пластические деформации при прокатке алюминиевых сплавов Al-Fe-Si оказываются малы (менее 15%), то процессы рекристаллизации могут и не начинаться, несмотря на достаточно высокие значения температур. Похожий вывод был сделан в статье [16], где обсуждалась прокатка сплава серии 5052 (система Al-Mg). Поэтому многостадийная обработка алюминиевых сплавов, каковой является горячая (иногда условно) прокатка, это сложный процесс, требующий анализа для каждого случая реализации его на производстве.

Целью работы является установление разницы между двумя вариантами прокатки с использованием гипотез различного вида: одна трактует процесс прокатки металла с сохранением уровня нагартовки от предыдущих проходов, другая основана на прохождении процессов полного разупрочнения в паузах между проходами.

### Производственные условия

Рассматриваются реальные условия прокатки слябовой заготовки из сплава АМгб на одном из заводов. Заготовка перед прокаткой имеет форму плиты толщиной 363,5 мм, шириной 4240 мм. Прокатка ведется в валках диаметром  $D = 1100$  мм, температура начала прокатки  $400^{\circ}\text{C}$ . В табл. 1 представлены параметры нескольких проходов и введены обозначения:  $N$  – номер прохода;  $H_0$ , и  $H_1$  – высота полосы до и после прохода;  $\Delta H$  – абсолютное обжатие за проход;  $\Delta H/H_0$  – относительное обжатие за проход;  $k = l/H_{cp}$  – фактор формы очага деформации;  $H_{cp} = (H_0 + H_1)/2$  – средняя высота полосы за проход;  $l = (\Delta H \cdot D/2)^{1/2}$  – длина очага деформации. Расчеты показали, что скорость деформации на этом этапе прокатки не очень велика и находится в пределах  $0,3-1,0 \text{ c}^{-1}$ .

Как видно из табл. 1, начальный этап прокатки связан с применением довольно малых обжатий, что должно приводить к локализации деформаций в приконтактных областях металла, особенно в первых проходах, когда толщина заготовки большая. В первых проходах проводится раскатка слитка на необходимую ширину поперек литейной оси, в данном случае ширина проката в проходе оказалась более 4 м,

что приводит к большим усилиям прокатки. Выбор малых обжатий обусловлен ограничениями по максимально допустимому усилию прокатки (80 МН) с учетом коэффициента запаса и возможным колебаниям свойств литого металла после разлива вследствие разной степени ликвации лигатуры и распределения модификаторов.

Фактор формы очага оказался менее единицы, что говорит о наличии высокого очага деформации. Обычно высокий очаг деформации характерен в случае прокатки толстых заготовок, например слябов [17], что привносит свои особенности, в том числе необходимость обработки кромок заготовки.

### Постановка задачи

Напряженно-деформированное состояние по проходам рассчитывали с помощью пакета программ DEFORM 2D/3D. Как выше было указано, ширина заготовки довольно большая (более 4 м), поэтому ограничились анализом плоского деформированного состояния: уширение металла отсутствует, ширина учитывалась только для расчета усилия и момента прокатки. В соответствии с рекомендациями [18] коэффициенты трения по Кулону приняты в зависимости от параметров очага деформации по проходам и составили величины в диапазоне 0,216-0,244.

Выше отмечалось, что в отличие от горячей прокатки стали или тяжелых металлов, прокатка алюминиевых сплавов осуществляется с торможением процессов рекристаллизации. Поскольку нет до сих пор достоверных сведений о том, проходит ли процесс либо динамической рекристаллизации в самом проходе прокатки, либо статической рекристаллизации в паузах между проходами, то принято решение моделирования и того и другого варианта прокатки. Предполагалось, что при сохранении нагартовки в предыдущих проходах металл будет упрочняться, что будет сказываться на увеличении энергосиловых параметров прокатки. Кроме того, упрочнение будет сначала локализовано в зонах повышенных деформаций. Для упрочняющегося материала это приведет к торможению деформации в этих зонах и распространению деформации на больший объем металла. Но если упрочнение будет снято процессом рекристаллизации, то весь объем металла перед следующим проходом окажется однородным и процесса выравнивания деформации происходить не будет.

Таблица 1. Параметры прокатки  
Table 1. Rolling parameters

N	$H_0$ , мм	$H_1$ , мм	$\Delta H$ , мм	$100 \cdot \Delta H/H_0$ , %	$l$ , мм	$H_{cp}$ , мм	$k$
1	363,5	357,4	6,1	1,7	58,0	360,4	0,161
2	357,8	350,8	7,0	1,9	61,9	354,3	0,175
3	350,9	345,1	5,8	1,7	56,5	348,0	0,162
4	345,1	339,0	6,1	1,8	57,8	342,1	0,169
5	339,0	310,0	29,0	8,5	126,2	324,5	0,389
6	310,0	280,0	30,0	9,7	128,5	295,0	0,436
7	280,0	249,8	30,2	10,8	128,8	264,9	0,486

В связи с этим постановка задачи включала два варианта: вариант 1 расчетов был основан на гипотезе отсутствия разупрочнения к последующему проходу, а по варианту 2 разупрочнение успевало проходить.

Естественно, что на результаты расчета в этом случае будет влиять вид кривых упрочнения сплава. Авторы воспользовались трехпараметрическими кривыми упрочнения из справочника [19], которые в формате программного модуля имели вид, отображенный на рис. 1. Смена выпуклости–вогнутости кривых взята из первоисточника. На этих кривых эффекта разупрочнения сплава не наблюдается, хотя для алюминиевых сплавов последнее не очевидно. Графики напряжений текучести flow stress перенесены в интерфейс программы точно для диапазона температур 320-460°C. На рис. 1 для примера выведен результат для температуры 400°C при различных скоростях деформации.

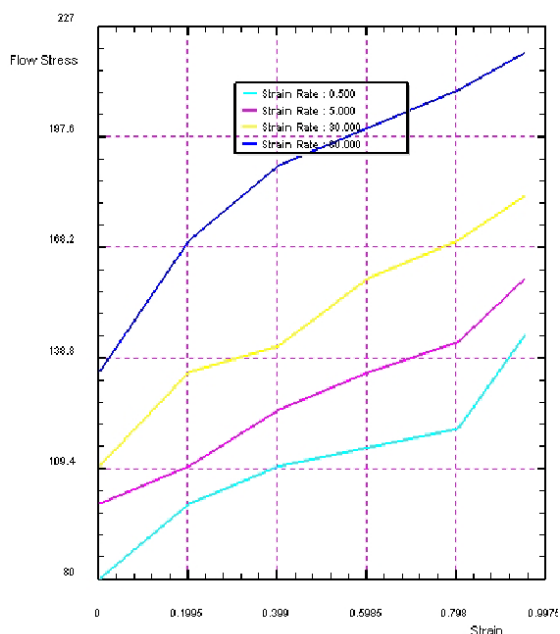


Рис. 1. Зависимость напряжений текучести flow stress от степени деформации strain и скорости деформации strain rate при температуре 400°C для сплава АМг6 в интерфейсе DEFORM

Fig. 1. Dependence between flow stress and strain and the strain rate at a temperature of 400°C for the AMg6 alloy in the DEFORM interface

Выполнены расчеты по маршруту прокатки в соответствии с параметрами табл. 1. Все поля напряжений и деформаций здесь не приводятся в целях экономии места. Особое внимание уделено седьмому проходу прокатки, к которому фактор формы очага деформации приближается к величине 0,5. В некоторых случаях это число берут за основу перехода от прокатки высоких заготовок к прокатке заготовок средней толщины.

### Результаты моделирования и их обсуждение

Деформированное состояние описано с помощью показателя скорости деформации (strain rate). В частности, применение именно скорости деформации позволяет отследить мгновенный очаг деформации, чего не удастся сделать при использовании степени деформации, которая может накапливаться от предыдущих проходов прокатки. На рис. 2, а приведена сетка конечных элементов на заготовке перед прокаткой к седьмому проходу, количество элементов 2096, количество узлов 2238. На рис. 2, б приведены результаты расчета для варианта 1, а на рис. 2, в – для варианта 2, при этом шкала параметра – общая. Из сравнения рисунков видно, что конфигурация очагов деформации практически одинаковая и характеризуется наличием локализации деформации вблизи поверхности валков. При этом в варианте 2 видно появление зоны несколько повышенной скорости деформации в центре полосы. Форма переднего конца полосы оказалась примерно одинаковой, то есть стремление к раскрытию торца сляба не зависит от накопления деформации по проходам.

Деформированное состояние описано с помощью показателя степени деформации strain effective (рис. 3). Здесь нестационарная стадия в проходе прокатки не рассматривается, а приводится распределение параметра в самой полосе уже после прокатки.

В данном случае шкалы разные, поскольку уровень накопленной деформации в месте ее локализации высок (рис. 3, а) и достигает 1,22. Следует отметить, что если рассчитать степень деформации после седьмого прохода по инженерным формулам, то получим  $\varepsilon_7 = 1,15 \cdot \ln(H_0 / H_7) = 1,15 \cdot \ln(363,5/249,8) = 0,431$ . Сравнение показывает, что превышение локальной деформации над усредненной составляет трехкратную величину. Для лучшего восприятия цветные уровни перестроены в графики зависимости степени деформации от высотной координаты (рис. 4).

Здесь видно, что в обоих вариантах деформация локализована в приповерхностных зонах. Естественно, что уровень накопленной деформации оказывается выше уровня частной деформации в проходе. При этом максимум накопленной деформации более смещен в сторону кромки полосы по отношению к максимуму частной деформации в проходе.

Такая неравномерность распределения деформации может вызывать слоистое строение структуры металла. Известно, что температура начала рекристаллизации является функцией степени деформации: при повышении степени деформации температура начала рекристаллизации снижается. Поэтому в местах проявления максимума степени деформации металл может оказаться рекристаллизован, а в соседних областях – нет. Такое слоистое строение толстолистового проката описано, в частности, в статье [4] применительно к сплаву Al-Si-Mg. Дополнительно указано, что неоднородность распределения деформации вызывает изменение текстуры и влияет на анизотропию свойств.

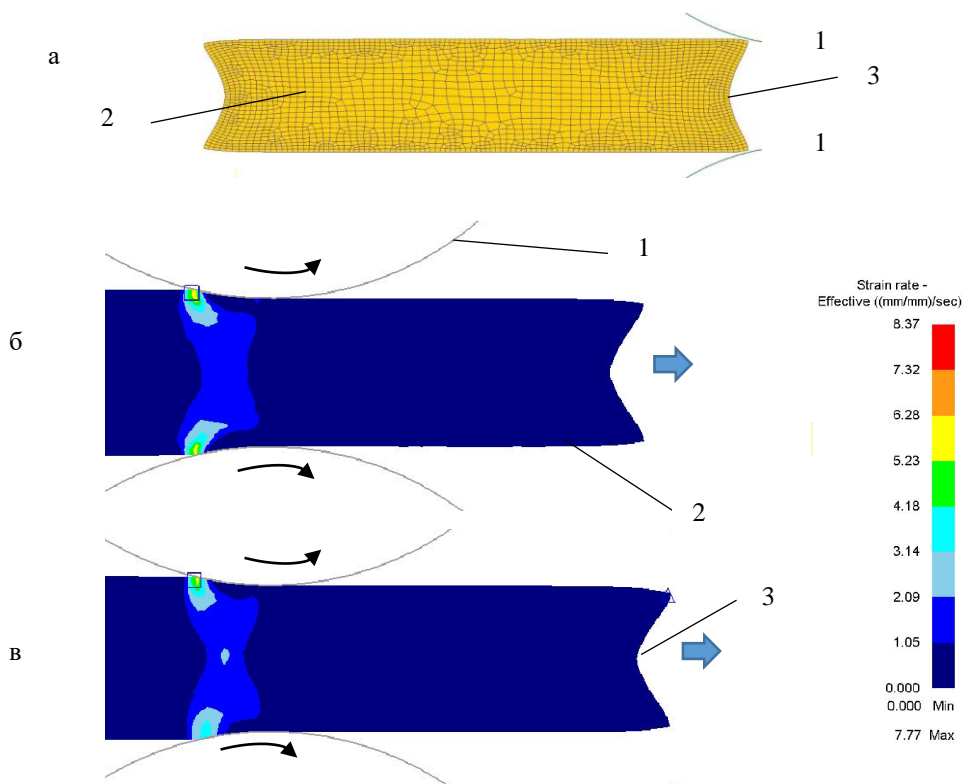


Рис. 2. Сетка конечных элементов на заготовке перед прокаткой к седьмому проходу с наличием раскрытия переднего торца заготовки 3 (а) и распределение скорости деформации в седьмом проходе по варианту 1 (б) и варианту 2 (в) при прокатке валками 1 полосы 2

Fig. 2. FEM mesh on the workpiece before rolling to the seventh pass with an opening of the front end of the workpiece 3 (a) and the distribution of the strain rate in the seventh pass according to option 1 (б) and option 2 (в) when rolling strip 2 with rolls 1

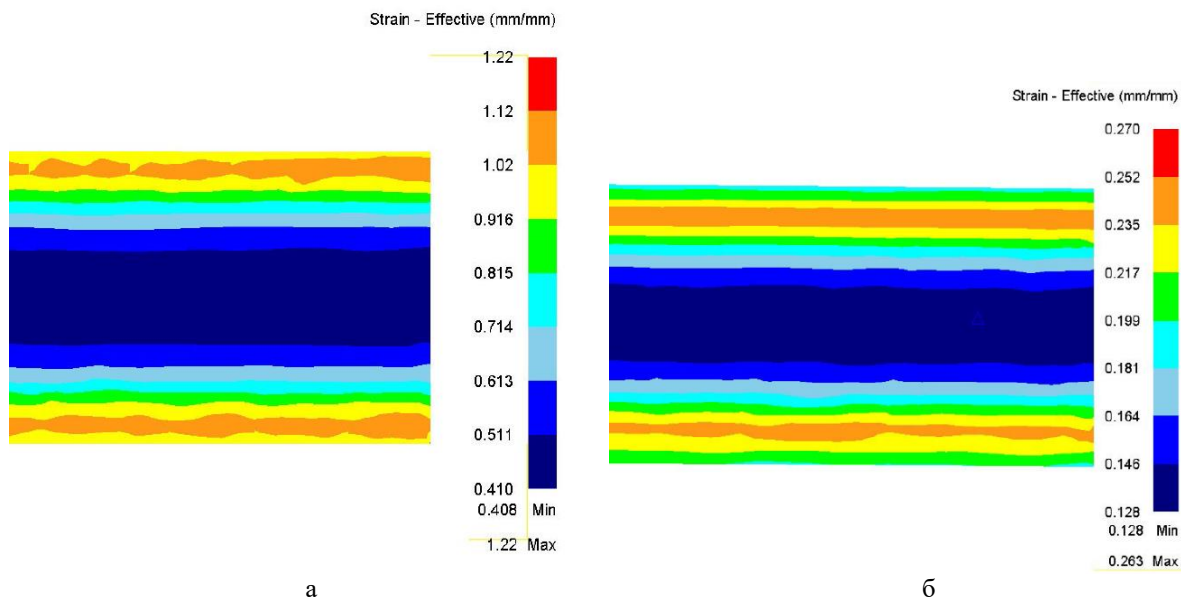


Рис. 3. Распределение степени деформации по толщине полосы в седьмом проходе прокатки по варианту 1 (а) и варианту 2 (б)

Fig. 3. Distribution of strain over strip thickness in the seventh rolling pass according to option 1 (a) and option 2 (б)

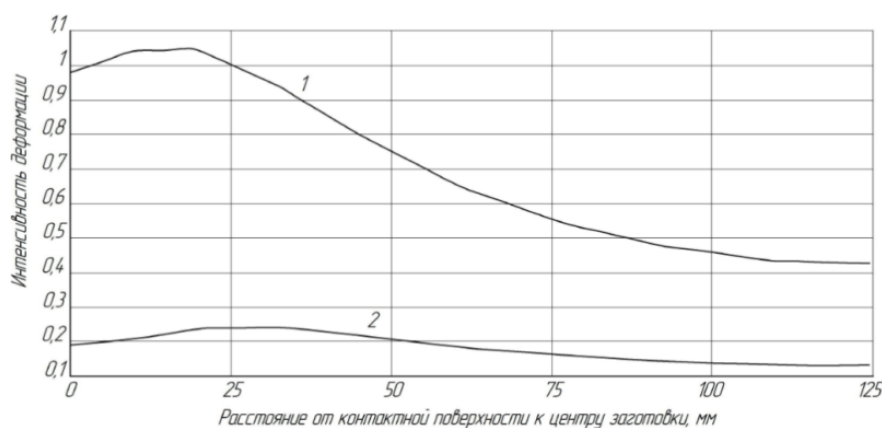


Рис. 4. Эпюра степени деформации вдоль высотной координаты для варианта 1 с накоплением деформации (линия 1) и варианта 2 для частичной деформации в проходе (линия 2)

Fig.4. Diagram of strain along the vertical coordinate for option 1 with accumulation of deformation (line 1) and option 2 for partial deformation in the pass (line 2)

Напряженное состояние проката отражено цветными уровнями интенсивности напряжений stress effective на **рис. 5, а** для варианта накопления деформации по проходам, а на **рис. 5, б** – для варианта прокатки рекристаллизованного металла.

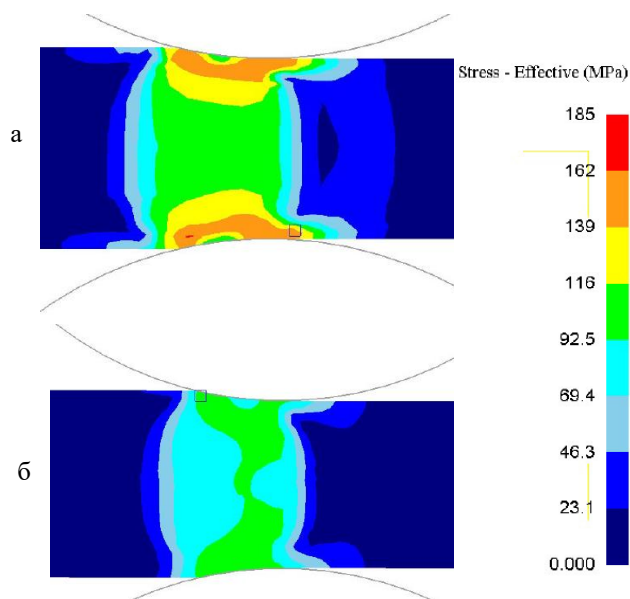


Рис. 5. Распределение интенсивности напряжений stress effective для варианта 1 с накоплением деформации (а) и варианта 2 для случая прокатки рекристаллизованного металла (б)

Fig.5. Distribution of stress intensity for option 1 with accumulation of deformation (а) and option 2 for rolling recrystallized metal (б)

Поскольку по варианту 1 металл остается в состоянии нагартовки после каждого прохода, то к седьмому проходу он упрочняется гораздо больше, чем рекристаллизованный перед каждым проходом металл. Поэтому интенсивность напряжений достигает значений до 185 МПа по первому варианту и только 100 МПа – по второму варианту. Происходит также сильная локализация областей повышенной интенсивности напряжений вблизи контактных поверхностей именно по первому варианту, что объясняется локализацией здесь накопленных деформаций с повторением схемы прокатки в высоком очаге деформации.

На **рис. 6** показана эпюра распределения нормального давления вдоль длины очага деформации в седьмом проходе прокатки для двух вариантов расчетов.

Здесь видно, что эпюры имеют примерно одинаковый вид и максимум при одной и той же координате длины очага деформации. При этом график 1 расположен выше графика 2, что объясняется прокаткой более прочного металла.

По виду графика на **рис. 6** можно сделать вывод о том, что длина зоны опережения превышает длину зоны отставания, что не характерно для обычной листовой прокатки. Но в данном случае прокатке подвергается высокая заготовка. Для заготовок с малой величиной фактора формы очага деформации  $l/H_{cp}$  отмечается превышение протяженности зоны опережения над длиной зоны отставания [20, с. 72].

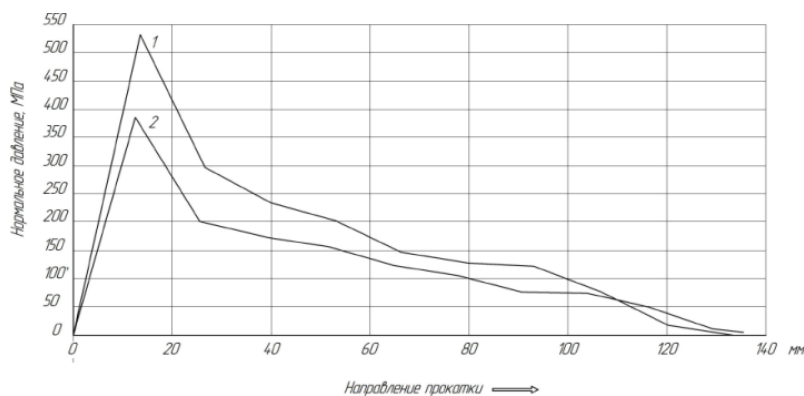


Рис. 6. Эпюра распределения нормального давления вдоль длины очага деформации в седьмом проходе прокатки для варианта 1 с накоплением деформации и варианта 2 для случая прокатки рекристаллизованного металла

Fig. 6. Diagram of the distribution of normal pressure along the length of the deformation zone in the seventh rolling pass for option 1 with accumulation of deformation and option 2 for rolling recrystallized metal

**Сравнение с производственными данными**

В данном случае имелась возможность сравнения расчетных показателей силы прокатки с данными системы мониторинга прокатного стана. В табл. 2 приведены значения силы прокатки, измеренные при реальной прокатке, и расчетные данные в двух вариантах постановки задачи.

Измерения инфракрасных пирометров, установленных в линии стана, показывают незначительное, в пределах 10-15°C, изменение температуры поверхности с колебаниями как в сторону уменьшения за счет процессов теплопередачи в окружающую среду, включая валки, так и с возможным повышением температуры после времени паузы, что связано с теплопередачей от горячей середины заготовки в сторону периферии.

Основываясь на реальных данных мониторинга температуры, которые показывали ее малое изменение в первых проходах, в начале работы было принято решение об изотермической постановке задачи, что позволило сэкономить и машинное время работы

процессора. Если бы расчеты были выполнены для последних проходов прокатки при наличии термически тонкого тела в виде листа, то пришлось бы решать параллельно и тепловую задачу.

С учетом гипотезы отсутствия разупрочнения отклонения от измеренных величин получились больше (от 10 до 30%), при этом расчетные данные оказались все с завышением результата. Если учитывать процесс разупрочнения, то процент отклонения оказывается меньше (от 2 до 20%). То есть гипотеза прохождения разупрочнения оказывается предпочтительной. Следует отметить, что эти данные нуждаются в проверке, потому что отсутствуют реальные картины микроструктуры металла. Мешает провести эти исследования большая масса проката – до нескольких тонн. Теплосодержание слябовой заготовки огромное и за время отбора образцов может пройти не одно структурное изменение. Сделанный вывод также имеет частный характер, его нельзя распространить на все алюминиевые сплавы, в которых закономерности структурных превращений могут оказаться другими.

Таблица 2. Сравнение силы прокатки по данным системы мониторинга и по результатам моделирования  
Table 2. Comparison of rolling force according to the monitoring system data and simulation results

Номер прохода	Сила по данным системы мониторинга, кН	Без прохождения разупрочнения		С прохождением разупрочнения	
		Сила (результаты моделирования), кН	Отклонение от данных системы мониторинга, %	Сила (результаты моделирования), кН	Отклонение от данных системы мониторинга, %
1	43047	47500	-10,3	47500	-10,3
2	39444	49625	-25,8	47504	-20,4
3	40234	50478	-25,5	46236	-14,9
4	39803	51755	-30,0	44967	-13,0
5	27508	31795	-15,6	28166	-2,4
6	29422	33118	-12,6	27627	+6,10
7	27269	35078	-28,6	26784	+1,8



### Заключение

Установлена разница между двумя вариантами слябовой прокатки алюминиевого сплава АМг6 с использованием гипотез различного вида: одна трактует процесс прокатки металла с сохранением уровня нагартовки от предыдущих проходов, другая основана на прохождении процессов полного разупрочнения в паузах между проходами.

Результаты моделирования двух вариантов прокатки и обработки результатов мониторинга промышленной прокатки показали, что ближе к практическим данным оказывается гипотеза прохождения разупрочнения между проходами прокатки. Это позволяет при выполнении дальнейших технологических расчетов использовать эту гипотезу для оптимизации процессов прокатки. Вместе с тем в случае прокатки других алюминиевых сплавов гипотеза должна проверяться вновь.

### Список источников

1. Modeling plasticity of an aluminum 2024T351 thick rolled plate for cold forming applications / Raphaël Cusset, Farida Azzouz, Jacques Besson, Marta Dragon-Louiset, Vincent Jacques, Henry Proudhon // *International Journal of Solids and Structures*. 2020, vol. 202, pp. 463-474. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2020.05.005>
2. Логинов Ю.Н., Середкина М.Ю. Исследование скоростного режима прокатки сляба из алюминиевого сплава с использованием МКЭ // *Технология легких сплавов*. 2015. №3. С. 121-126.
3. Forming characteristics of slabs during rough rolling / Salganik V.M., Pesin A.M., Sychev O.N., Denisov S.V., & Skrylev A.A. // *Metallurgist*. 2008, vol. 52, pp. 700-704. <https://doi.org/10.1007/s11015-009-9125-4>
4. Влияние скорости горячей прокатки на структурно-текстурное состояние плиты алюминиевого сплава системы Al-Si-Mg / Лобанов М.Л., Логинов Ю.Н., Данилов С.В., Головин М.А., Карабаналов М.С. // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2018. №5(755). С. 49-54.
5. The effect of rolling temperature on the microstructure and properties of multi pass rolled 7A04 aluminum alloy / Peng Sun, Hongfu Yang, Rensong Huang, Yelin Zhang, Shanju Zheng, Mengnie Li, Sivasankar Koppala // *Journal of Materials Research and Technology*. 2023, vol. 25, pp. 3200-3211. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.06.123>
6. Прессование алюминиевых сплавов. Моделирование и управление тепловыми условиями / Довженко Н.Н., Беляев С.В., Сидельников С.Б., Довженко И.Н., Лопатина Е.С., Галиев Р.И. Красноярск: СФУ, 2009. 255 с.
7. Numerical investigation of the surface recrystallization during the extrusion of a AA6082 aluminum alloy under different process conditions / Negrozio M.,

Pelaccia R., Donati L., Reggiani B. // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023, vol. 129, pp. 1585-1599. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12397-8>

8. Вайнблат Ю.М., Ланцман П.Ш., Шаршагин Н.А. Диаграммы структурных состояний горячедеформированных алюминиевых сплавов // *Известия вузов. Цветная металлургия*. 1974. №1. С. 155-160.
9. Логинов Ю.Н., Лобанов М.Л., Головин М.А. Модель описания деформации алюминиевых сплавов при их горячей прокатке с учетом рекристаллизационных процессов // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2016. №9. С. 32-36.
10. Построение кривых текучести алюминиевого сплава АМг5 на основе натурального и вычислительного экспериментов / Петров П.А., Фам В.Н., Бурлаков И.А., Матвеев А.Г., Сапрыкин Б.Ю., Петров М.А. // *Технология легких сплавов*. 2022. №2. С. 65-74.
11. Study of features of texture and structure evolution during hot rolling in a continuous group of stands of aluminum alloy 6016 / Aryshensky E.V., Aryshensky V.Yu., Kaurova E.S., Tribunsky A.V. // *Tsvetnye Metally*. 2021, vol. 7, pp. 84-91. DOI: 10.17580/tsm.2021.07.11
12. Recrystallization model for hot-rolling of 5182 aluminum alloy / Zhang H., Peng D.S., Yang L.B., Meng L.P. // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2001, vol. 11, no. 3, pp. 382-386.
13. Mirdar M., Serajzadeh S. Simulation of microstructural changes after hot deformation of aluminum-magnesium alloy using cellular automata // *Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design*. 2023, vol. 6, pp. 505-518. <https://doi.org/10.1007/s41939-023-00159-8>
14. Логинов Ю.Н., Непряхин С.О., Исякаев К.Т. Цифровое моделирование прокатки сляба из алюминиевого сплава с малым обжатием // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2023. Т. 21. №3. С. 128-131.
15. Study of recrystallization kinetics in aluminum alloy billets with low degree of ascast structure / Yashin V.V., Aryshenskiy E.V., Konovalov S.V., Stozharov D.A. // *Tsvetnye Metally*. 2022, vol. 11, pp. 75-80. DOI: 10.17580/tsm.2022.11.09
16. Zeng Q., Wen X., Zhai T. Texture evolution rate in continuous cast AA5052 aluminum alloy during single pass hot rolling // *Materials Science and Engineering: A*. 2008, vol. 476, iss. 1-2, pp. 290-300. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.05.010>
17. Forming characteristics of slabs during rough rolling / Salganik V.M., Pesin A.M., Sychev O.N., Denisov S.V., & Skrylev A.A. // *Metallurgist*. 2008, vol. 52, pp. 700-704. <https://doi.org/10.1007/s11015-009-9125-4>
18. Меерович И.М. Прокатка плит и листов из легких сплавов. М.: Металлургия, 1969. 252 с.

19. Буркин С.П., Бабайлов Н.А., Овсянников Б.В. Сопротивление деформации сплавов Al и Mg: Справочное пособие. Екатеринбург: УрФУ, 2010. 344 с.
20. Рудской А.И., Лунев В.А. Теория и технология прокатного производства: учеб. пособие. СПб.: Наука, 2008. 527 с.

## References

- Raphaël Cusset, Farida Azzouz, Jacques Besson, Marta Dragon-Louiset, Vincent Jacques, Henry Proudhon. Modeling plasticity of an aluminum 2024T351 thick rolled plate for cold forming applications. *International Journal of Solids and Structures*. 2020;(202):463-474. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2020.05.005>
- Loginov Yu.N., Seredkina M.Yu. Study on the speed schedule of rolling an aluminum alloy slab using FEM. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of Light Alloys]. 2015;(3):121-126. (In Russ.)
- Salganik V.M., Pesin A.M., Sychev O.N., Denisov S.V., Skrylev A.A. Forming characteristics of slabs during rough rolling. *Metallurgist*. 2008;(52):700-704. <https://doi.org/10.1007/s11015-009-9125-4>
- Lobanov M.L., Loginov Yu.N., Danilov S.V., Karabanalov M.S., Golovin M.A. Effect of the hot rolling rate on the structure and texture condition of plates of the Al – Si – Mg alloy system. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metal Science and Heat Treatment]. 2018;(60):322-328. DOI: 10.1007/s11041-018-0279-1
- Peng Sun, Hongfu Yang, Rensong Huang, Yelin Zhang, Shanju Zheng, Mengnie Li, Sivasankar Koppala. The effect of rolling temperature on the microstructure and properties of multi pass rolled 7A04 aluminum alloy. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023;25:3200-3211. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.06.123>
- Dovzhenko N.N., Belyaev S.V., Sidelnikov S.B., Dovzhenko I.N., Lopatina E.S., Galiev R.I. *Pressovaniye aluminiumykh splavov. Modelirovanie i upravlenie teplovymi usloviyami* [Pressing of aluminum alloys. Modeling and control of thermal conditions]. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2009, 255 p. (In Russ.)
- Negozio M., Pelaccia R., Donati L., Reggiani B. Numerical investigation of the surface recrystallization during the extrusion of a AA6082 aluminum alloy under different process conditions. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023;(129):1585-1599. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12397-8>
- Vainblat Yu.M., Lanzman P.Sh., Sharshagin N.A. Diagrams of structural states of hot-deformed aluminum alloys. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya* [News of Higher Educational Institutions. Non-ferrous Metallurgy]. 1974;(1):155-160. (In Russ.)
- Loginov Yu.N., Lobanov M.L., Golovnin M.A. A model for describing the deformation of aluminum alloys during hot rolling, taking into account recrystallization processes. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroyenii* [Blanking Production in Mechanical Engineering]. 2016;(9):32-36. (In Russ.)
- Petrov P.A., Fam V.N., Burlakov I.A., Matveev A.G., Saprykin B.Yu., Petrov M.A. Construction of yield curves for aluminum alloy AMg5 based on full-scale and computational experiments. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of Light Alloys]. 2022;(2):65-74. (In Russ.)
- Aryshensky E.V., Aryshensky V.Yu., Kaurova E.S., Tribunsky A.V. Study of features of texture and structure evolution during hot rolling in a continuous group of stands of aluminum alloy 6016. *Tsvetnye Metally*. 2021;(7):84-91. DOI: 10.17580/tsm.2021.07.11
- Zhang H., Peng D.S., Yang L.B., Meng L.P. Recrystallization model for hot-rolling of 5182 aluminum alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2001;11(3):382-386.
- Mirdar M., Serajzadeh S. Simulation of microstructural changes after hot deformation of aluminum–magnesium alloy using cellular automata. *Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design*. 2023;6:505-518. <https://doi.org/10.1007/s41939-023-00159-8>
- Loginov Yu.N., Nepryakhin S.O., Isyakaev K.T. Digital modeling of rolling an aluminum alloy slab with low reduction. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroyenii* [Blanking Production in Mechanical Engineering]. 2023;21(3):128-131. (In Russ.)
- Yashin V. V., Aryshenskiy E. V., Konovalov S. V., Stozharov D. A. Study of recrystallization kinetics in aluminum alloy billets with low degree of as-cast structure. *Tsvetnye Metally*. 2022;11:75-80. DOI: 10.17580/tsm.2022.11.09
- Zeng Q., Wen X., Zhai T. Texture evolution rate in continuous cast AA5052 aluminum alloy during single pass hot rolling. *Materials Science and Engineering: A*. 2008;476(1-2):290-300. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.05.010>
- Salganik V.M., Pesin A.M., Sychev O.N., Denisov S.V., Skrylev A.A. Forming characteristics of slabs during rough rolling. *Metallurgist*. 2008;52:700-704. <https://doi.org/10.1007/s11015-009-9125-4>
- Meerovich I.M. *Prokatka plit i listov iz legkikh splavov* [Rolling of plates and sheets of light alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1969, 252 p. (In Russ.)
- Burkin S.P., Babailov N.A., Ovsyannikov B.V. *Soprotivlenie deformatsii splavov Al i Mg: Spravochnoe posobie* [Resistance to deformation of Al and Mg alloys: Handbook]. Yekaterinburg: Ural Federal University, 2010, 344 p. (In Russ.)
- Rudskoy A.I., Lunev V.A. *Teoriya i tekhnologiya prokatnogo proizvodstva: ucheb. posobie* [Theory and technology of rolling production: study guide]. Saint Petersburg: Nauka, 2008, 527 p. (In Russ.)

Поступила 04.03.2024; принята к публикации 03.04.2024; опубликована 30.09.2024  
Submitted 04/03/2024; revised 03/04/2024; published 30/09/2024

**Логинов Юрий Николаевич** – доктор технических наук, профессор,  
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
Екатеринбург, Россия; Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия.  
Email: j.n.loginov@urfu.ru. ORCID 0000-0002-7222-2521

**Непряхин Сергей Олегович** – кандидат технических наук, доцент,  
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия.  
Email: s.o.nepriakhin@urfu.ru. ORCID 0000-0003-3331-5618

**Исякаев Кирилл Тимиргалеевич** – аспирант,  
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия;  
ОАО «Каменск-Уральский металлургический завод», Каменск-Уральский, Россия.  
Email: IsyakaevKT@kumw.ru.

**Yuri N. Loginov** – DrSc (Eng.), professor,  
Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia;  
Mikheev Institute of Metal Physics, the Ural Branch, the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia.  
Email: j.n.loginov@urfu.ru, ORCID: 0000-0002-7222-2521

**Sergey O. Nepriakhin** – PhD (Eng.), Associate Professor,  
Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia.  
Email: s.o.nepriakhin@urfu.ru, ORCID: 0000-0003-3331-5618

**Kirill T. Isyakaev** – postgraduate student,  
Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia;  
OJSC Kamensk-Uralsky Metallurgical Works, Kamensk-Uralsky, Russia.  
Email: IsyakaevKT@kumw.ru

# НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ NEW TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)  
УДК 621.791.92.019:004.9  
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-3-188-196



## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТНОСТИ МЕТАЛЛА ЗАГОТОВОК, ПОЛУЧЕННЫХ АДДИТИВНЫМИ МЕТОДАМИ, НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННОСЕТЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Кабалдин Ю.Г., Аносов М.С., Чернигин М.А., Мордовина Ю.С.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева, Нижний Новгород, Россия

**Аннотация.** Стремясь к снижению себестоимости производства, современная промышленность все чаще обращается к аддитивным способам получения заготовок. Несмотря на очевидные преимущества аддитивного выращивания металлов, особенности данных технологий до сих пор изучены недостаточно хорошо. Рассматриваемые в данной работе методы 3D-печати металлами (SLM и WAAM) обладают рядом недостатков, среди которых основными являются возможность образования повышенной пористости заготовок, высокий уровень остаточных напряжений в материале и структурная неоднородность наплавленного металла. Целью данного исследования являлась оценка пористости и структурных дефектов наплавленного металла и разработка метода оценки степени опасности дефектов материалов на основе нейронносетового моделирования. В ходе проведения работы были изготовлены образцы из аустенитных сталей 12X18H10T методом селективного лазерного спекания (SLM) и 08X18H10 методом электродугового наплавки (WAAM). Металлографические исследования проводились на оптическом микроскопе Altamі MET1C при увеличениях  $\times 50$ , 100, 200. В частности, была проведена оценка загрязненности наплавленного металла неметаллическими включениями в соответствии с ГОСТ 1778. Для исследования природы образования пористости в работе проводилось фрактографическое исследование излома образцов на растяжение. Для изучения влияния дефектов в наплавленном металле на прочностные свойства были проведены испытания на растяжение. Для оценки степени опасности различных дефектов был проведен количественный и фрактальный анализ микроструктур с использованием специализированного программного обеспечения, разработанного в MATLAB. Обучение нейросетевой модели также проводилось с использованием MATLAB. В ходе проведения исследования было установлено, что на образование пористости в образцах после SLM оказывает сильное влияние качество исходного сырья. Образцы, полученные путем электродугового выращивания, обладают меньшей пористостью и загрязненностью неметаллическими включениями относительно образцов после лазерного спекания. Установлена линейная связь между показателем фрактальной размерности микроструктуры и площадью пор и несплавлений в анализируемом цифровом изображении микроструктуры, подтверждаемая результатами испытаний на растяжение.

**Ключевые слова:** аддитивное выращивание, SLM, WAAM, пористость, дефекты наплавленного металла, нейронносетовое моделирование, фрактальный анализ

*Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-79-00095 «Разработка научно-технологических основ структурообразования конструкционных материалов полученных путем аддитивного электродугового выращивания для формирования механических свойств при усталости с использованием подходов искусственного интеллекта».*

© Кабалдин Ю.Г., Аносов М.С., Чернигин М.А., Мордовина Ю.С., 2024

### Для цитирования

Оценка влияния дефектности металла заготовок, полученных аддитивными методами, на прочностные свойства с использованием нейронносетового моделирования / Кабалдин Ю.Г., Аносов М.С., Чернигин М.А., Мордовина Ю.С. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №3.С. 188-196. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-188-196>



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

## NEURAL NETWORK MODELING USED TO ASSESS THE EFFECT OF METAL DEFECTS OF BLANKS PRODUCED BY ADDITIVE METHODS ON STRENGTH PROPERTIES

Kabaldin Yu.G., Anosov M.S., Chernigin M.A., Mordovina Yu.S.

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract.** In an effort to reduce production costs, modern industry has increasingly turned to additive methods for producing blanks. Although benefits of additive metal production are obvious, the characteristics of these techniques have not been sufficiently studied. The paper describes the methods of 3D printing with metals, such as selective laser melting (SLM) and wire arc additive manufacturing (WAAM), showing several disadvantages. These include the possibility of forming increased porosity in blanks, as well as high residual stresses in the material and structural heterogeneity in the deposited metal. The research was aimed at assessing porosity and structural defects in the deposited metal, and developing a method to determine the degree of risk of material defects using neural network modeling. During the research, samples were produced from austenitic steels 12Kh18N10T using SLM and 08Kh18N10 using WAAM. Metallographic studies were conducted with an Altami MET 1C optical microscope with magnifications of  $\times 50$ , 100 and 200. In particular, the level of contamination of the deposited metal with non-metallic inclusions was evaluated in accordance with GOST 1778. To study the nature of the porosity formation, the authors conducted a fractographic analysis of fracture in tensile samples. Tensile tests were performed to study the effect of defects in deposited metal on strength characteristics. Using specialized software developed in Matlab, a quantitative and fractal analysis of microstructure was performed to assess the risk entailed by various defects. A neural network model was also trained using Matlab. The study showed that the formation of porosity in the samples produced by SLM was greatly influenced by the quality of the feedstock material. The samples produced by WAAM have lower porosity and contamination with non-metallic inclusions compared with the samples produced by laser melting. The paper contains a linear relationship established between the fractal dimension of the microstructure and the area of pores and zones of faulty fusion in the analyzed digital image of the microstructure proved by the tensile tests.

**Keywords:** additive manufacturing, SLM, WAAM, porosity, defects of deposited metal, neural network modeling, fractal analysis

*The study was supported by grant of the Russian Science Foundation No. 22-79-00095 "Developing the scientific and technological framework for structuring of construction materials produced by wire arc additive manufacturing to form mechanical properties of fatigue, using artificial intelligence approaches".*

### For citation

Kabaldin Yu.G., Anosov M.S., Chernigin M.A., Mordovina Yu.S. Neural Network Modeling Used to Assess the Effect of Metal Defects of Blanks Produced by Additive Methods on Strength Properties. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 3, pp. 188-196. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-188-196>

### Введение

В настоящее время взамен классическим технологиям получения заготовок все чаще находят свое применение различные технологии аддитивного выращивания. К числу наиболее распространенных методов 3D-печати можно отнести технологию SLM (Selective laser melting, на русском языке – селективное лазерное спекание) и WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing, на русском языке – электродуговое выращивание) [1-3]. В процессе аддитивного выращивания могут успешно изготавливаться заготовки из сплавов на основе Ti [4], Al [5], стали [6] и Ni [7], что является преимуществом данных технологий. К преимуществам аддитивных методов производства также можно отнести:

- 1) возможность полной автоматизации изготовления заготовок изделий;
- 2) снижение ресурсоемкости производства, особенно сильно проявляющееся при производстве изделий из дорогостоящих материалов, например титана и никелевых сплавов;
- 3) снижение общей себестоимости выпуска продукции, обеспечивающее возможность выпуска единичных и мелкосерийных изделий, экономически не выгодных при применении традиционных технологий [8, 9].

Технология SLM осуществляет послойное сплавление металлического порошка за счет энергии лазера, что позволяет производить сложные по конфигурации заготовки изделий с использованием CAD-моделей [10].

Технология WAAM заключается в наплавлении обычной сварочной проволоки, широко распространенной в продаже, на подложку, в результате чего образуется заготовка будущей детали. По сравнению с традиционным производством, WAAM позволяет сократить время изготовления на 40-60% и время последующей обработки на 15-20% в зависимости от размера детали [4].

Однако заготовки, полученные с применением аддитивных технологий, могут иметь ряд существенных недостатков [11-13], таких как повышенная пористость, высокий уровень остаточных напряжений материала, а также структурная неоднородность металла.

Целью исследования является оценка пористости и дефектов структуры аустенитных сталей, полученных с использованием методов SLM и WAAM, а также разработка метода оценки степени опасности дефектов материалов на основе нейронносетового моделирования.

### Материалы и методики исследования

Изготовление образцов методом SLM осуществлялось из порошка стали 10X18H10T с размером сферических частиц 50-80 мкм. Наплавка образцов выполнялась в виде брусков на установке Rusmelt 300M. Было получено несколько образцов с использованием разного исходного порошка (образцы №1 и 2). При наплавке образцов использовался порошок, изготовленный одним производителем, но образец №1 наплавлялся с использованием только что вскрытой упаковки, а порошок для образца №2 уже использовался до этого, и заводская упаковка была вскрыта заранее.

Образцы, изготовленные методом WAAM, выполнялись в виде стенок на экспериментальной исследовательской WAAM-установке, в состав которой входили: трехкоординатный станок с ЧПУ портального типа IVCNC STL, сварочный источник тока Alloy 275 ME Pulse, вытяжной шкаф, сварочный стол и сварочная горелка. Реализуемый на стенде способ 3D-печати на станках с ЧПУ защищен патентом RU 2696121C1. Наплавка образцов осуществлялась сварочной проволокой Св-08X18H10 (ER308Lsi).

Таблица 1. Химический состав наплавленных образцов  
Table 1. Chemical composition of the deposited samples

Марка материала и способ наплавки	Содержание химического элемента, %									
	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cu	Mo	Cr	Ti
10X18H10T, SLM	0,080	0,694	0,432	0,236	0,147	10,600	0,296	0,991	17,100	0,472
08X18H10, WAAM	0,011	1,803	0,791	0,012	0,013	10,210	0,102	0,091	18,951	0

Металлографические исследования проводились в поперечном сечении относительно направления наплавки при увеличениях  $\times 50$ , 100, 200 на оптическом микроскопе *Altami METIC*. Приготовление шлифов осуществлялось по стандартной методике при помощи механического шлифования наждачной бумагой различной зернистости и полирования с использованием паст. В качестве реактива при химическом травлении применялся раствор, состоящий из  $5 \text{ см}^3 \text{ HNO}_3$ ,  $50 \text{ см}^3 \text{ HCl}$  и  $50 \text{ см}^3 \text{ H}_2\text{O}$ .

Химический состав наплавленного металла определялся на оптико-эмиссионном анализаторе Foundry-Master и представлен в **табл. 1**.

Количественный и фрактальный анализ микроструктур проводили с использованием специализированного программного обеспечения, разработанного в MATLAB. Обучение нейросетевой модели производили также с использованием программной среды MATLAB.

Фрактографическое исследование образцов осуществлялось на растровом электронном микроскопе Tescan Vega 3. Испытания на растяжение проводились на плоских пропорциональных образцах толщиной 6 мм (тип I по ГОСТ 1497).

### Полученные результаты и их обсуждение

Основной проблемой аддитивного производства заготовок считают повышенную пористость образцов. Особенно это касается метода SLM, так как металлические порошки, используемые при наплавке, имеют высокую удельную поверхность, что обуславливает возможность наличия высокой пористости в наплавленном металле. В случае ненадлежащих условий хранения исходного порошка на поверхности порошинок может происходить адсорбция загрязняющих веществ, что также повышает риск возникновения повышенной пористости.

Для изучения образования пористости металла и загрязненности неметаллическими включениями проводилось исследование поверхности нетравленных шлифов. Степень загрязненности металла неметаллическими включениями определялась на микрошлифах при увеличении  $\times 100$  (**рис. 1**) в соответствии с ГОСТ 1778-2022.

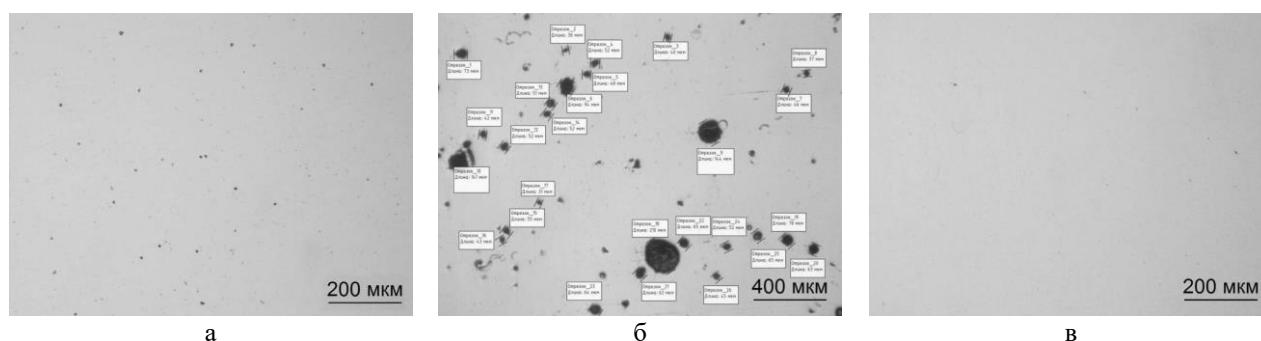


Рис. 1. Нетравленные шлифы образцов:

а – SLM, образец №1,  $\times 100$ ; б – SLM, образец №2,  $\times 50$ ; в – WAAM,  $\times 100$

Fig. 1. Non-etched metallographic samples: а is SLM, sample No. 1,  $\times 100$ ; б is SLM, sample No. 2,  $\times 50$ ; в is WAAM,  $\times 100$

В ходе исследования нетравленных шлифов в образце № 2, наплавленном методом SLM, выявлено большое количество пор и подсузачных раковин [14], оценка загрязненности неметаллическими включениями не представляется возможной. На образование таких скоплений пор может оказывать влияние загрязнение порошка различными примесями или нерасплавление отдельных частиц металлического порошка, что подтверждается литературными данными [15]. На нерасплавление отдельных частиц порошка указывают также результаты фрактографического исследования разрывных образцов (рис. 2).

На поверхности излома разрывного образца отчетливо выделяются сферические частицы, соответствующие по размеру исходному порошку. Результаты исследования на загрязненность неметаллическими включениями представлены в табл. 2.

При анализе результатов определения загрязненности неметаллическими включениями установлено, что металл образцов, наплавленных методом WAAM,

содержит меньшее количество включений. Следует отметить, что максимально допустимая загрязненность неметаллическими включениями регламентируется при изготовлении конкретного изделия. Загрязненность оксидами точечными 2 балла может допускаться даже при изготовлении изделий из особо высококачественных сталей.

Особенностью применения аддитивного выращивания при изготовлении заготовок изделий является образование большого количества наплавочных валиков, структурно схожих со сварным швом в традиционных технологиях. Считается, что сварной шов в изделии, полученном традиционными методами, является слабым местом, и разрушение будущей детали будет происходить в зоне термического влияния (ЗТВ). Вследствие этого изучение границ наплавочных валиков представляло наибольший интерес при металлографическом исследовании. Микроструктуры границ наплавочных валиков представлены на рис. 3.

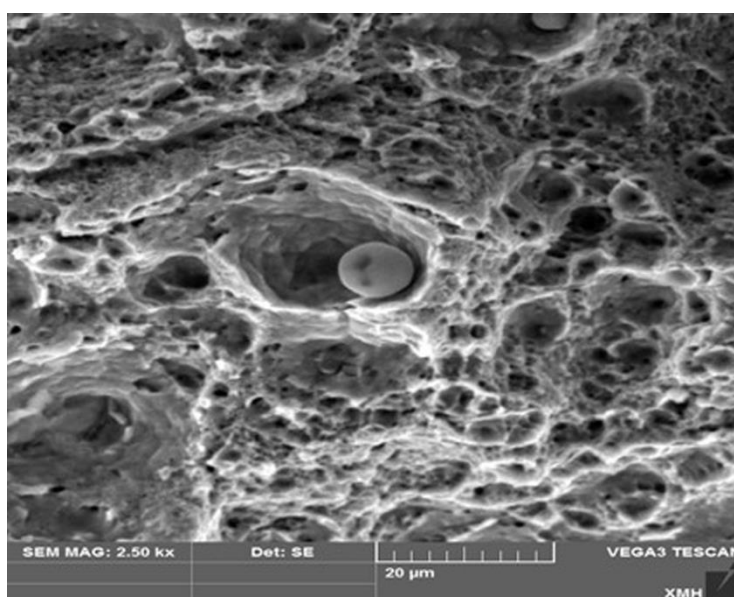


Рис. 2. Фрактограмма излома образца №2, полученного методом SLM, после его растяжения,  $\times 2500$

Fig. 2. Fractograph of fracture of sample No. 2 produced by SLM after tension,  $\times 2500$

Таблица 2. Загрязненность металла неметаллическими включениями  
Table 2. Contamination of metal with non-metallic inclusions

Вид включения	Балл по ГОСТ 1778	
	Образец № 1, SLM	WAAM
Оксиды точечные	2	0,5
Оксиды строчечные	0	0
Нитриды точечные	1	0
Нитриды строчечные	0	0
Сульфиды	0	0
Силикаты недеформирующиеся, хрупкие и пластичные	0	0

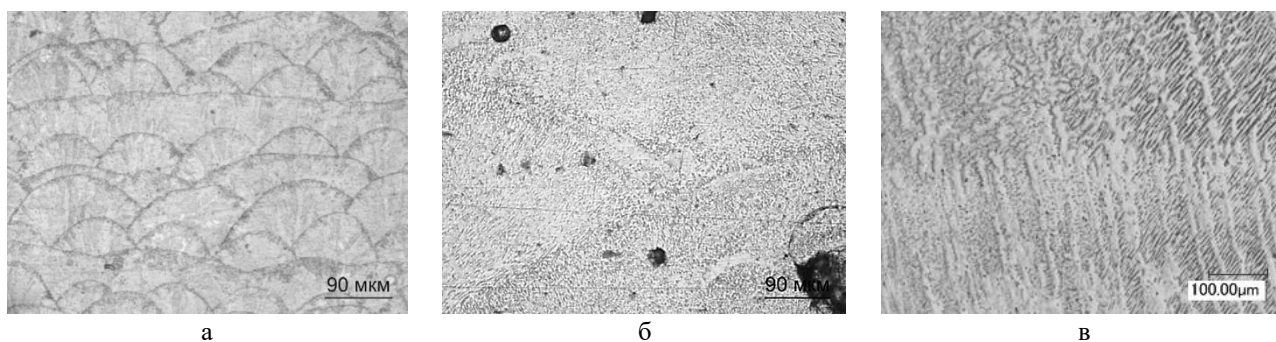


Рис. 3. Микрофотографии границы раздела металла образцов,  $\times 200$ :

а – SLM, образец №1; б – SLM, образец №2; в – WAAM

Fig. 3. Micrographs of the metal interfaces of the samples,  $\times 200$ : а is SLM, sample No. 1; б is SLM, sample No. 2; в is WAAM

Несмотря на различную толщину наплавленных валиков, изменяющуюся от 0,2-0,5 мм для метода SLM и составляющую около 0,8-1,4 мм для метода WAAM, по границам раздела различных наплавленных слоев отсутствуют различные несплавления.

Структура образца № 1, наплавленного методом SLM (рис. 3, а), представлена относительно мелкими аустенитными зёрнами, направленными в направлении отвода тепла. Отчетливо наблюдаются аустенитные двойники. Ближе к границам сплавления слоев происходит измельчение структуры, видны anomalно мелкие аустенитные зёрна (также ориентированы по направлению отвода тепла).

Микроструктура образца № 2, полученного методом SLM, схожа со структурой, получаемой методом WAAM, это может быть обусловлено большей толщиной наплавленных слоев, а следовательно, меньшим термическим влиянием, оказываемым наплавкой последующих слоев металла. Структура обоих образцов преимущественно дендритная (рис. 3 б, в). Вблизи границы сплавления дендриты ориентированы нормально к ней, что может быть обусловлено наличием градиента температур, а в глубине наплавленного металла расположены беспорядочно. Следует отметить, что в образце № 2, наплавленном методом SLM, образуется преимущественно ячеисто-дендритная структура, а в случае наплавки WAAM структура изменяется по мере движения от границы сплавления в глубину наплавленного металла от яче-

исто-дендритной к преимущественно дендритной с неупорядоченной ориентировкой.

По результатам проведенных исследований была разработана нейросетевая модель, позволяющая проводить оценку степени опасности дефектов в процессе SLM- и WAAM-печати. Степень опасности дефекта в нейронной сети задавалась коэффициентом  $K$  (степень опасности), который изменялся от 0 до 1, где 0 – безопасный уровень дефектов и 1 – опасный уровень дефектов, приводящий к ускоренному разрушению материала в процессе эксплуатации.

Для оценки степени опасности дефектов микроструктуры фотографии микроструктур предварительно обрабатывались с использованием программного обеспечения MATLAB. По результатам обработки красным цветом выделялись области (поры, микротрещины, несплавления частиц и др.), относящиеся к дефектам микроструктуры. После чего в используемом программном обеспечении производился подсчет:

- 1) количества дефектов  $N$  в анализируемом изображении микроструктуры на  $1 \text{ мм}^2$  микроструктуры;
- 2) общей относительной площади дефектов в анализируемом изображении  $Q$  (от 0 до 1);
- 3) фрактальной размерности изображения микроструктуры  $DF$ , которая отражает устойчивость формирования скопления дефектов на анализируемом изображении микроструктуры.



Для оценки степени опасности дефектов выявленные количественные показатели отправляется на вход нейросетевой модели (рис. 4), где на выходе определяется степень опасности дефектов (показатели 1, 2, 3 и т.д.) анализируемой микроструктуры. Оценка опасности дефектов производилась на основе анализа не менее 10-ти фотографий микроструктур из различных зон образцов свидетелей.

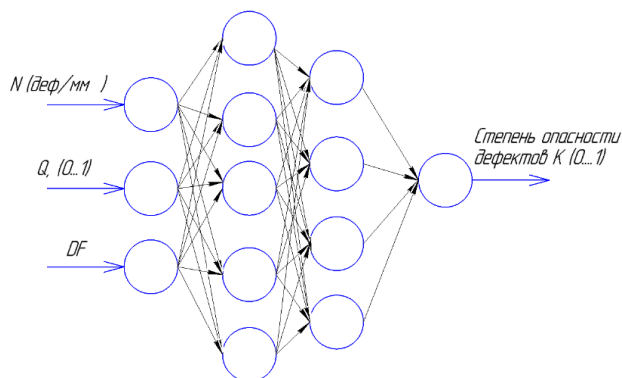


Рис. 4. Нейросетевая модель оценки степени опасности дефектов при аддитивном выращивании

Fig. 4. A neural network model for assessing the risk of defects in additive manufacturing

На рис. 5 показана зависимость фрактальной размерности микроструктуры от площади пор и несплавлений на примере сплава 12X18H10T. Данная зависимость носит линейный характер, следовательно, параметры  $Q$  и  $DF$  в нейросетевой модели скоррелированы, а для прогнозирования степени опасности дефектов можно использовать только один показатель (рис. 5).

Анализ рис. 5 показывает, что с уменьшением площади пор и скоплений фрактальная размерность увеличивается, что свидетельствует о повышении устойчивости структурного состояния металла к упругопластической деформации. В результате даже при небольшом скоплении пор на малых площадях могут образовываться субмикротрещины. Сегрегация дефектов способствует развитию субмикротрещины при внешних нагрузках.

Результаты испытаний образцов на растяжение представлены в табл. 3.

Результаты испытаний образцов, наплавленных методом WAAM (см. табл. 3), говорят о возможности использования данного метода при изготовлении заготовок изделий, так как прочностные свойства образцов достигают значений прокатанного материала даже без применения дополнительной термообработки или других методов упрочнения.

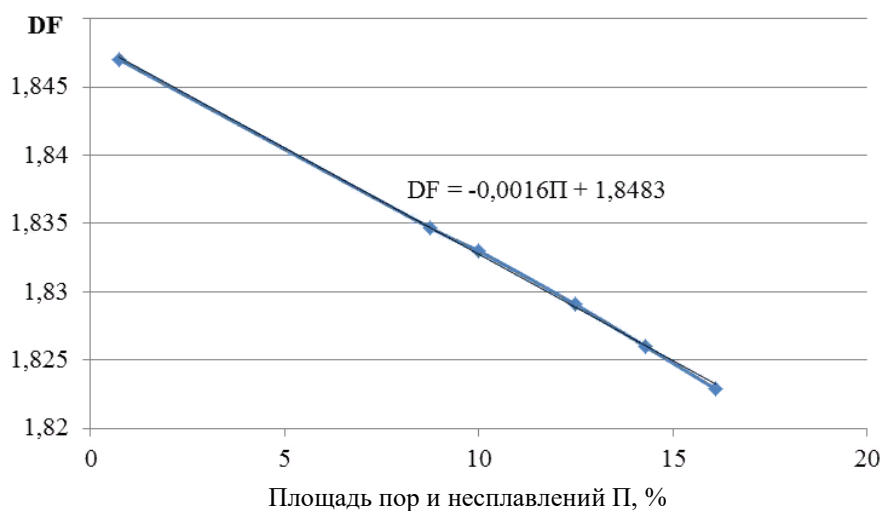


Рис. 5. Зависимость фрактальной размерности цифрового изображения микроструктуры от площади пор и несплавлений П (сплав 12X18H10T), SLM-печать

Fig. 5. Relationship between the fractal dimension of the digital image of the microstructure and the area of pores and zones of faulty fusion П for the SLM printed alloy 12Kh18N10T

Таблица 3. Результаты испытаний образцов из стали 12X18H10T (SLM) и стали 08X18H9 (WAAM)  
Table 3. Test results of the samples made of steel 12Kh18N10T (SLM) and 08Kh18N9 steel (WAAM)

Марка материала, способ получения	$\delta$ , %	$\sigma$ , МПа	
		$\sigma_r$	$\sigma_b$
08X18H10, прокатка	41,73	263,3	535
08X18H10, WAAM	38,2	310	555
12X18H10T, образец № 1 SLM	68	360,2	728
12X18H10T, образец № 2 SLM	67	295	520

При изучении результатов, полученных при растяжении образцов, наплавленных методом SLM, видно, что наличие в образце повышенной пористости приводит к снижению  $\sigma_b$  металла практически на 30%. Снижение прочностных свойств в пористом металле согласуется с данными, полученными при помощи разрабатываемой нейросетевой модели.

Прочностные свойства металла образца №1, полученного методом SLM, превосходят соответствующие значения для образца, изготовленного из проката. Данный эффект отражен в ряде исследований и может быть объяснен тем, что в данном случае один наплавленный валик занимает сравнительно малый объем относительно всего наплавленного металла, в нем могут концентрироваться различные дефекты. Скопление различных интерметаллидов и возможных структурных дефектов отчетливо видно на рис. 3, а, б. При растяжении образцов, полученных методом SLM, дефекты и интерметаллиды, скопившиеся по границам наплавленных валиков, могут выступать эффективными барьерами движения дислокаций, что, в свою очередь, приводит к повышению прочностных свойств.

### Выводы

1) Рассмотрены особенности образования пор, границ раздела и включений при технологиях аддитивного выращивания. Установлено, что металлы, полученные по технологии аддитивного электродугового выращивания, имеют меньшую пористость и степень загрязненности неметаллическими включениями по сравнению с металлом, полученным по технологии SLM.

2) Наибольшее влияние на пористость металла, наплавленного методом SLM, оказывает качество исходного сырья.

3) Разработана нейросетевая модель оценки степени опасности дефектов, полученных аддитивным выращиванием на основе количественной цифровой обработки микроструктур.

4) Установлена линейная связь между показателем фрактальной размерности микроструктуры и площадью пор и несплавлений в анализируемом цифровом изображении микроструктуры.

5) Влияние пористости металла заготовок, полученных методом SLM, проявляется в снижении, прежде всего, предела прочности.

### Список источников

1. Review of Wire Arc Additive Manufacturing for 3D Metal Printing / Li Johnnie Liew Zhong, Alkahari M.R., Rosli N.A.B., Hasan R., Sudin M.N., Ramli F.R. // International Journal of Automation Technology. 2019, vol. 13, no. 3, pp. 346-353. DOI: 10.20965/ijat.2019.p0346
2. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: Properties, defects and quality improvement / Wu Bintao, Pan Zengxi, Ding Donghong, Cuiuri D.,

- Li Huijun, Xu Jing, Norrish J. // Journal of Manufacturing Processes. 2018, vol. 35, pp. 127-139. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.08.001
3. Energy consumption model for additive-subtractive manufacturing processes with case study / Jackson M.A., Van Asten A., Morrow J.D. et al. // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology. 2018, vol. 5, pp. 459-466. DOI: 10.1007/s40684-018-0049-y
4. Wire + arc additive manufacturing / Williams S.W., Martina F., Addison A.C., Ding J., Pardal G., Colegrove P. // Materials Science and Technology. 2016, vol. 32, no. 7, pp. 641-647. DOI: 10.1179/1743284715Y.0000000073
5. The strengthening effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on the additively manufactured Al-6.3Cu alloy / Gu Jianglong, Ding Jialuo, Williams S.W., Gu Huimin, Bai Jing, Zhai Yuchun, Ma Peihua // Materials Science and Engineering: A. 2016, vol. 651, pp. 18-26. DOI: 10.1016/j.msea.2015.10.101
6. Guo Nannan, Leu Ming. Additive manufacturing: Technology, applications and research needs // Frontiers of Mechanical Engineering. 2013, vol. 8, pp. 215-243. DOI: 10.1007/s11465-013-0248-8
7. Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Inconel 625 Alloy during Pulsed Plasma Arc Deposition Process / Xu Fujia, Lv Yaohui, Liu Yuxin, Shu Fengyuan, He Peng, Xu Binshi // Journal of Material Science and Technology. 2013, vol. 29, no. 5, pp. 480-488. DOI: 10.1016/j.jmst.2013.02.010
8. Advanced technologies for additive manufacturing of metal product / Oskolkov A.A., Matveev E.V., Bezukladnikov I.I. et al. // Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie. 2018, vol. 20, no. 3, pp. 90-105. DOI: 10.15593/2224-9877/2018.3.11
9. Cost modelling and sensitivity analysis of wire and arc additive manufacturing / Cunningham C.R., Wikshåland S., Xu F., Kemakolam N., Shokrani A., Dhokia V., Newman S.T. // Procedia Manufacturing, 2017, vol. 11, pp. 650-657. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.163
10. Wang Fude, Williams S., Rush M. Morphology investigation on direct current pulsed gas tungsten arc welded additive layer manufactured Ti6Al4V alloy // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, vol. 57, pp. 597-603. DOI: 10.1007/s00170-011-3299-1
11. Directed Energy Deposition (DED) Additive Manufacturing: Physical Characteristics, Defects, Challenges and Applications / Svetlizky David, Das Mitun, Zheng Baolong et al. // Materials Today. 2021, vol. 49, pp. 271-295. DOI: 10.1016/j.mattod.2021.03.020
12. Tomar Bunty, Shiva S., Nath Tameshwer. A review on wire arc additive manufacturing: Processing parameters, defects, quality improvement and recent advances // Ma-

- terials Today Communications. 2022, vol. 31, 103739. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2022.103739
13. The influence of microstructural anisotropy on the hot deformation of wire arc additive manufactured (WAAM) Inconel718 / Lan Bo, Wang Yaping, Liu Yuehan et al. // *Materials Science and Engineering: A*. 2021, vol. 823, 141733. DOI: 10.1016/j.msea.2021.141733
  14. Васин О.Е. и др. Атлас дефектов // Научно-технический сборник. Екатеринбург: Издательские решения, 2008. 56 с.
  15. Jing G., Wang Z. Defects, densification mechanism and mechanical properties of 300M steel deposited by high power selective laser melting // *Additive Manufacturing*. 2021, vol. 38, 101831. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101831
  7. Xu Fujia, Lv Yaohui, Liu Yuxin, Shu Fengyuan, He Peng, Xu Binshi. Microstructural evolution and mechanical properties of Inconel 625 alloy during pulsed plasma arc deposition process. *Journal of Material Science and Technology*. 2013;29(5):480-488. DOI:10.1016/j.jmst.2013.02.010
  8. Oskolkov A.A., Matveev E.V., Bezukladnikov I.I., Trushnikov D.N., Krotova E.L. Advanced technologies for additive manufacturing of metal product. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie* [Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanical Engineering, Materials Science]. 2018;20(3):90-105. (In Russ.) DOI:10.15593/2224-9877/2018.3.11
  9. Cunningham C.R., Wikshåland S., Xu F., Kemakolam N., Shokrani A., Dhokia V., Newman S.T. Cost modelling and sensitivity analysis of wire and arc additive manufacturing. *Procedia Manufacturing*. 2017;11:650-657. DOI:10.1016/j.promfg.2017.07.163
  10. Wang Fude, Williams S., Rush M. Morphology investigation on direct current pulsed gas tungsten arc welded additive layer manufactured Ti6Al4V alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2011;57:597-603. DOI:10.1007/s00170-011-3299-1
  11. Svetlizky David, Das Mitun, Zheng Baolong et al. Directed Energy Deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications. *Materials Today*. 2021;49:271-295. DOI:10.1016/j.mattod.2021.03.020
  12. Tomar Bunty, Shiva S., Nath Tameshwer. A review on wire arc additive manufacturing: Processing parameters, defects, quality improvement and recent advances. *Materials Today Communications*. 2022;31:Article ID 103739. DOI:10.1016/j.mtcomm.2022.103739
  13. Lan Bo, Wang Yaping, Liu Yuehan et al. The influence of microstructural anisotropy on the hot deformation of wire arc additive manufactured (WAAM) Inconel718. *Materials Science and Engineering: A*. 2021;823:Article ID 141733. DOI:10.1016/j.msea.2021.141733
  14. Vasin O.E. et al. *Atlas defektov. Nauchno-tekhnicheskii sbornik* [Atlas of defects. Scientific and technical collection]. Yekaterinburg: Izdatelskie resheniya, 2008, 56 p. (In Russ.)
  15. Jing G., Wang Z. Defects, densification mechanism and mechanical properties of 300M steel deposited by high power selective laser melting. *Additive Manufacturing*. 2021;38:Article ID 101831. DOI:10.1016/j.addma.2020.101831

### References

Поступила 13.03.2024; принята к публикации 23.04.2024; опубликована 30.09.2024  
Submitted 13/03/2023; revised 23/04/2024; published 30/09/2024

**Кабалдин Юрий Георгиевич** – доктор технических наук, профессор, руководитель лаборатории, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.  
Email: uru.40@mail.ru. ORCID 0000-0003-4300-6659

**Аносов Максим Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент,  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.  
Email: anosov-maksim@list.ru. ORCID 0000-0001-8150-9332

**Чернигин Михаил Алексеевич** – аспирант, инженер,  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.  
Email: honeybadger52@yandex.ru.

**Мордовина Юлия Сергеевна** – аспирант, ассистент,  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.  
Email: ips4@nntu.ru.

**Yuri G. Kabaldin** – DrSc (Eng.), Professor, Head of the Laboratory,  
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.  
Email: uru.40@mail.ru. ORCID 0000-0003-4300-6659

**Maksim S. Anosov** – PhD (Eng.), Associate Professor,  
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.  
Email: anosov-maksim@list.ru. ORCID 0000-0001-8150-9332

**Mikhail A. Chernigin** – postgraduate student, engineer,  
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.  
Email: honeybadger52@yandex.ru

**Yulia S. Mordovina** – postgraduate student, Assistant,  
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.  
Email: ips4@nntu.ru