

ВЕСТНИК

Магнитогорского государственного технического
университета им. Г.И. Носова

2022. Т.20, №4

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

Издается с марта 2003 года

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Председатель редакционной коллегии
В.М. Колокольников (Россия)

Ж.-Б. Вогт (Франция), С.Е. Гавришев (Россия),
В.Е. Громов (Россия), Я. Грум (Словения),
И.Г. Гун (Россия), М. Дабала (Италия),
Х. Дыя (Польша), Р.О. Дюссан (Индия),
Р. Кавалла (Германия), В.Н. Калмыков (Россия),
Д.Р. Каплунов (Россия), А.Г. Корчунов (Россия),
О.С. Логунова (Россия), Д. Милованович (Сербия),
К. Мори (Япония), И. Мусирин (Малайзия),
А.Б. Найзабеков (Казахстан), 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

© ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2022

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

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

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

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

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

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

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

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

Адрес редакции:

455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»
пр. К. Маркса, 45/2, оф. 402
Тел.: (3519) 22-14-93.
URL: <http://www.vestnik.mgtu.ru>
Email: rio_mgtu@mail.ru; vestnik@mgtu.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 22.12.2022. Заказ 294. Тираж 500 экз. Цена свободная.

VESTNIK

of Nosov Magnitogorsk State Technical University

2022. Vol.20, no.4

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

PUBLISHED SINCE MARCH, 2003

EDITORIAL BOARD MEMBERS

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

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

© Federal State Budgetary Institution of Higher Education
Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2022

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.mgtu.ru>
Email: rio_mgtu@mail.ru; vestnik@mgtu.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: 22.12.2022. Order 294. Circulation: 500. Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

Разработка полезных ископаемых	5
<i>Великанов В.С., Дёрина Н.В., Кочержинская Ю.В., Мамай Н.В., Логунова Т.В.</i>	
Применение задачи о брахистохроне в исследовании траектории спуска сосуда на открытых горных работах	5
<i>Сергеев В.В., Герасименко Т.Е., Евдокимов С.И., Герасименко Н.П.</i>	
Анализ технических решений для повышения эффективности проветривания глубоких карьеров	15
Технологии переработки и утилизации техногенных образований и отходов	26
<i>Лавриненко А.А., Гольберг Г.Ю., Хамзина Т.А.</i>	
Состояние процессов обезвоживания угольных флотационных концентратов	26
<i>Фадеева Н.В., Орехова Н.Н., Колодежная Е.В., Нигматова Н.Н.</i>	
Исследование физико-химических закономерностей процесса флотации графитовой спели	37
Обработка металлов давлением	47
<i>Сидельников С.Б., Берсенева А.С., Горбунов Ю.А., Загиров Н.Н., Лопатина Е.С., Ворошилов Д.С., Дурнопьянов А.В.</i>	
Разработка и исследование процесса бесслитковой прокатки-прессования прутков из алюминиевого сплава 6082	47
<i>Соломонов К.Н., Тишук Л.И., Бахаев К.В.</i>	
Анализ схемы течения металла в процессах деформирования плоской заготовки	58
Технологии обработки материалов	67
<i>Серебряков И.С., Латфулина Ю.С., Напримерова Е.Д., Мясоедов В.А., Самодурова М.Н.</i>	
Исследование механических и технологических свойств покрытия медь-карбид кремния	67
Стандартизация, сертификация и управление качеством	83
<i>Казанцева Т.В., Казанцева Н.К., Полякова М.А., Пиджакова Е.Н., Александров В.А.</i>	
Применение алфавитного подхода для определения количества информации, содержащейся в стандартах	83
<i>Голубчик Э.М., Чикишев Д.Н.</i>	
Разработка нового показателя оценки качества металлопроката для эмалирования и методики его определения	95
Моделирование металлургических процессов	102
<i>Полецков П.П., Алексеев Д.Ю., Кузнецова А.С., Гулин А.Е., Емалеева Д.Г., Адисhev П.Г.</i>	
Анализ схем охлаждения листового проката на основе компьютерного моделирования	102
<i>Дегтярева-Кашутина А.С., Болдырев И.С.</i>	
Апробация температурной модели круглого врезного шлифования с использованием метода конечных элементов	110

CONTENTS

Mining	5
<i>Velikanov V.S., Dyorina N.V., Kocherzhinskaya Yu.V., Mamay N.V., Logunova T.V.</i>	
The Brachistochrone Problem Applied in the Study on a Conveyance Descending Trajectory in Open Pit Mining	5
<i>Sergeev V.V., Gerasimenko T.E., Evdokimov S.I., Gerasimenko N.P.</i>	
Analysis of Technical Solutions for Increasing Efficiency of Ventilation of Deep Open Pits	15
Recycling of Man-Made Mineral Formations and Waste	26
<i>Lavrinenko A.A., Golberg G.Yu., Khamzina T.A.</i>	
Coal Froth Concentrate Dewatering Processes	26
<i>Fadeeva N.V., Orekhova N.N., Kolodezhnaya E.V., Nigmatova N.N.</i>	
Study on the Physical and Chemical Regularities of the Kish Graphite Flotation Process	37
Metal Forming	47
<i>Sidelnikov S.B., Bersenev A.S., Gorbunov Yu.A., Zagirov N.N., Lopatina E.S., Voroshilov D.S., Durnopyanov A.V.</i>	
Developing and Studying the Process of Direct Extruding of Rods from Aluminum Alloy 6082	47
<i>Solomonov K.N., Tishchuk L.I., Bakhaev K.V.</i>	
Analysis of the Metal Flow Diagram in Flat Bar Forming Processes	58
Material Process Engineering	67
<i>Serebriakov I.S., Latfulina Yu.S., Naprimerova E.D., Myasoedov V.A., Samodurova M.N.</i>	
Study of Mechanical and Technological Properties of Copper-Silicon Carbide Coatings	67
Standardization, Certification and Quality Management	83
<i>Kazantseva T.V., Kazantseva N.K., Polyakova M.A., Pidzhakova E.N., Aleksandrov V.A.</i>	
Applying an Alphabetical Approach to Determine the Amount of Information Contained in Standards	83
<i>Golubchik E.M., Chikishev D.N.</i>	
Development of a New Indicator for Assessing the Quality of Rolled Steel Products for Enameling and Methods for Its Determination	95
Modelling of Metallurgical Processes	102
<i>Poletskov P.P., Alekseev D.Yu., Kuznetsova A.S., Gulin A.E., Emaleeva D.G., Adishchev P.G.</i>	
Analysis of Simulated Plate Cooling Schedules	102
<i>Degtyareva-Kashutina A.S., Boldyrev I.S.</i>	
Testing a Temperature Model of Cylindrical Plunge Grinding Using the Finite Element Method	110

Новые технологические процессы и оборудование.....	120
<i>Пашков А.Е., Пашков А.А., Самойленко О.В.</i> Исследование начальных напряжений процесса обработки дробью	120
<i>Козлов А.В., Дерябин И.П., Верещагин В.С., Платов С.И., Кургузов С.А., Терентьев Д.В., Звягина Е.Ю.</i> Повышение точности формы отверстий в составных деталях	129
Строительные материалы и строительные технологии в металлургии.....	137
<i>Кришан А.Л., Песин А.М., Локотунина Н.М., Матвеев С.В., Пивоварова К.Г.</i> Новое конструктивное решение виброзащиты стыкового соединения железобетонного перекрытия с использованием самозаклинивающихся структур.....	137
Стратегия развития, подготовка и обучение специалистов.....	144
<i>Красносельская Д.Х., Тимирьянова В.М.</i> Оценка полицентричности систем расселения: чувствительность к методам, количеству наблюдений и уровню агрегирования данных.....	144

New Technological Processes and Equipment.....	120
<i>Pashkov A.E., Pashkov A.A., Samoylenko O.V.</i> Development of Initial Stresses During Shot Peening	120
<i>Kozlov A.V., Deryabin I.P., Vereshchagin V.S., Platov S.I., Kurguzov S.A., Terentev D.V., Zvyagina E.Yu.</i> Improvement of Hole Shape Accuracy in Composite Parts.....	129
Construction Materials and Construction Engineering in Metallurgy	137
<i>Krishan A.L., Pesin A.M., Lokotunina N.M., Matveev S.V., Pivovarova K.G.</i> A New Construction Solution for Vibration Protection of the Butt Joint of Reinforced Concrete Floors Using Interlocking Structures.....	137
Development Strategy, Specialist Education and Professional Training	144
<i>Krasnoselskaya D.Kh., Timiryanova V.M.</i> Estimate of Settlement Systems' Polycentricity: Sensitivity to Methods, Number of Observations and a Level of Data Aggregation	144

РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ MINING

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

УДК 622.24

DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-4-5-14



ПРИМЕНЕНИЕ ЗАДАЧИ О БРАХИСТОХРОНЕ В ИССЛЕДОВАНИИ ТРАЕКТОРИИ СПУСКА СОСУДА НА ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТАХ

Великанов В.С.^{1,2}, Дёрина Н.В.³, Кочержинская Ю.В.³, Мамай Н.В.¹, Логунова Т.В.³

¹ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

² Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

³ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). В статье рассматривается проблема зависимости устойчивости и эффективности освоения глубоких карьеров от актуального выбора технологии и техники для осуществления горных работ. С увеличением глубины карьера усложняются условия транспортировки полезных ископаемых, увеличивается расстояние осуществляемых перевозок, наблюдается рост высоты подъема горной массы и снижение производительности технологического оборудования. В статье представлен анализ существующих конструкций подъемников и наклонных конвейеров. Дается логическое обоснование применению классической задачи о брахистохроне с целью упрощенного описания движения грузового сосуда. В работе продемонстрировано одно из перспективных решений вопроса совершенствования карьерного транспорта с применением грузовых сосудов, движущихся по рельсовым направляющим. При этом трасса спуска реализуется как максимально приближенная к брахистохроне – кривой наискорейшего спуска. Авторами статьи представлены аналитические зависимости для определения основных характеристик спуска сосуда на открытых горных работах. Полученные данные позволяют реализовывать математическую модель трассы спуска, так как доказывают оптимальность профиля трассы для движения грузового сосуда. **Цель исследования.** Представить преимущества использования брахистохроны в процессе спуска грузового сосуда для доставки вспомогательных карьерных грузов к местам ведения открытых горных работ. **Используемые методы.** Применение комплексного подхода позволяет решить поставленные задачи. Его использование в рамках настоящего исследования предполагает функционирование методов научного анализа, компилирования данных из ранее опубликованных исследований, аналитических зависимостей и системного анализа. **Практическая значимость.** Данный подход может быть реализован для компенсации негативного эффекта увеличения глубины разработки на экономические показатели горного предприятия при эксплуатации глубоких карьеров. Модернизация и реконструкции горнотранспортных систем карьеров осуществляются за счет внедрения перспективных средств доставки вспомогательных грузов с максимальной адаптацией к существующей внутрикарьерной инфраструктуре.

Ключевые слова: брахистохрона, карьер, открытые горные работы, сосуд, конвейер, транспорт, подъемник

© Великанов В.С., Дёрина Н.В., Кочержинская Ю.В., Мамай Н.В., Логунова Т.В., 2022

Для цитирования

Применение задачи о брахистохроне в исследовании траектории спуска сосуда на открытых горных работах / Великанов В.С., Дёрина Н.В., Кочержинская Ю.В., Мамай Н.В., Логунова Т.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №4. С. 5-14. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-5-14>



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

THE BRACHISTOCHRONE PROBLEM APPLIED IN THE STUDY ON A CONVEYANCE DESCENDING TRAJECTORY IN OPEN PIT MINING

Velikanov V.S.^{1,2}, Dyorina N.V.³, Kocherzhinskaya Yu.V.³, Mamay N.V.¹, Logunova T.V.³

¹ Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

² Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia

³ Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The paper considers the dependence between stability and efficiency of exploitation of deep pits and a relevant selection of mining technology and facilities. When the pit becomes deeper, minerals transportation conditions are characterized as more complicated, entailing a longer conveying distance, greater rock mass hoisting height and lower performance of production equipment. The paper analyzes the existing designs of hoists and inclined conveyors. It contains a logical rationale for applying the classic brachistochrone problem to simplify a description of conveyance movement. The paper shows one of promising solutions to improve open pit transport with conveyances, moving along guidance rails. The descending route is approximated to the brachistochrone, namely a curve of fastest descent. The authors of the paper present the analytical dependence to determine main characteristics of the conveyance descending in open pit mining. The data are used to design a mathematical model of the descending route, as they prove an optimum profile of the route for conveyances. **Objective:** To show advantages of applying the brachistochrone in conveyance descending to deliver auxiliary materials to zones of open pit mining. **Methods Applied.** The applied integrated approach is used to solve the issues. Its application in the research implies functioning of scientific analysis methods, compiling data from the published studies, analytical dependence and a system analysis. **Practical Relevance.** This approach may be used to offset a negative effect of an increased depth of mining on economic performance of the mining plant, when operating deep pits. Mining and conveyor systems of pits are modernized and revamped by introducing promising means of delivery of auxiliary materials adapted to the maximum to the existing infrastructure in the pit.

Keywords: brachistochrone, pit, open pit mining, conveyance, conveyor, transport, hoist

For citation

Velikanov V.S., Dyorina N.V., Kocherzhinskaya Yu.V., Mamay N.V., Logunova T.V. The Brachistochrone Problem Applied in the Study on a Conveyance Descending Trajectory in Open Pit Mining. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 4, pp. 5-14. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-5-14>

Введение

Отличительной особенностью развития мировой горнодобывающей промышленности на обозримую перспективу является устойчивый тренд на открытый способ разработки, обеспечивающий наилучшие экономические показатели. Удельный вес открытых горных работ в общем объеме добычи полезных ископаемых, по оценкам экспертов, составляет: в мире – 72-73%, в США – 83%, в Российской Федерации (РФ) и странах СНГ – порядка 70%. Современная технология добычи полезных ископаемых и основные функции по перемещению грузов реализуются с использованием современных видов

транспорта [1]. Необходимо заметить, что общая глубина многих крупных карьеров превышает 200 м, в то время как проектная глубина разработок часто достигает и 700-1000 м [2]. Карьеры перекрывают 90% объем добычи минерального сырья открытым способом.

Как правило, глубина карьеров выступает определяющим фактором, усложняющим условия транспортирования добываемых ископаемых с нижних горизонтов, что подразумевает увеличение дальности перевозок и изменение высоты подъема горной массы, рост средневзвешенных уклонов и ограничение пропускной способности транспортных коммуникаций внутри карьера. Тенденция к сокращению производительности

оборудования на уровне каждых 100 м составляет: в экскаваторно-автомобильных комплексах – экскаваторов 10-15%, автосамосвалов 25-39%; в экскаваторно-железнодорожных комплексах – экскаваторов 17-19%, локомотивосоставов 8,5-20%. Соответственно, размер высоты рабочей зоны увеличивается до 250-300 м, а ширина рабочих площадок уменьшается, в то же время снижается уровень обеспеченности запасами, готовыми к выемке, до 0,4-1,0 месяца, а что касается угла погашения бортов карьера, то происходит его увеличение [3-5].

Таким образом, решение транспортной проблемы выступает основным условием эффективности и продуктивности глубоких карьеров. Однако, как справедливо утверждают специалисты, в условиях открытых горных работ (ОГР) трудоемкость процесса транспортировки остается достаточно высокой, к тому же доля транспорта составляет порядка 60-75% в себестоимости добычи, для глубоких карьеров эта доля достигает 80%.

Для описания карьерного транспорта в научно-технической литературе по открытым разработкам рассматривается автомобильный, железнодорожный и конвейерный транспорт, а также для транспортировки полезных ископаемых в карьерах используются специальные транспортные средства.

Основными карьерными грузами считаются вскрышные породы и полезное минеральное сырье. Соответственно, подъем их на поверхность осуществляется с помощью транспортных средств, представленных выше. К категории вспомогательных грузов относятся взрывчатка, путевые материалы (балласт и шпалы), детали горных машин, смазочные средства и др. Как правило, процесс доставки данных грузов изначально предполагает спуск к месту осуществления горных работ.

Существуют разнообразные системы и средства технологического транспорта, которые справляются с резким увеличением длины транспортной траектории на спуск и подъем, но при этом оказывают негативное воздействие на окружающую среду. Применение самоходного транспорта отличается рядом преимуществ, а именно высокой маневренностью и скоростью передвижения, но предполагает при этом один существенный недостаток – значительное загрязнение окружающей среды. Отработанные газы, выделяемые в процессе транспортировки в атмосферу карьера, содержат вредные приме-

си, включающие следующие вредные компоненты: окись углерода, окислы азота. Несмотря на то, что дизельный двигатель выделяет большое количество сажи, в чистом виде в ней не наблюдается никаких вредных веществ. Помимо высокой поглощающей способности, частицы сажи содержат молекулы и частицы токсичных веществ, включая канцерогены [6]. К решению данной проблемы необходимо подходить комплексно, так как в этом случае дополнительно приходится говорить о вентиляции глубоких карьеров. Современные требования к охране окружающей среды и освоению недр определяют необходимость использования новых подходов и видов транспортного оборудования, минимизирующих риски вредного воздействия на окружающую среду при его эксплуатации на горных предприятиях [6].

В научно-технической литературе достаточно подробно описаны результаты исследований, рассматривающих использование крутонаклонных конвейеров и подъемников в тяжелых горнотехнических условиях при разработке глубоководных месторождений полезных ископаемых открытым способом [7-25].

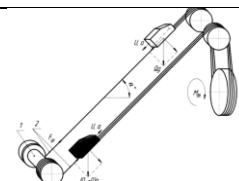
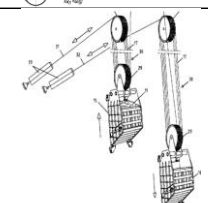
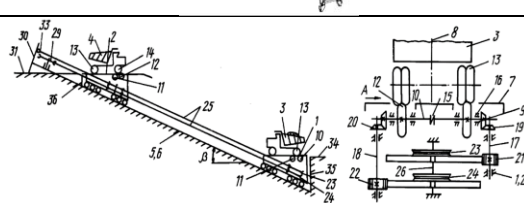
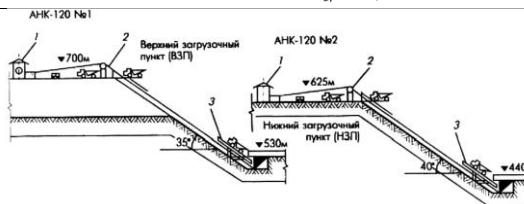

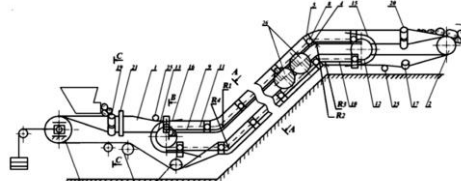
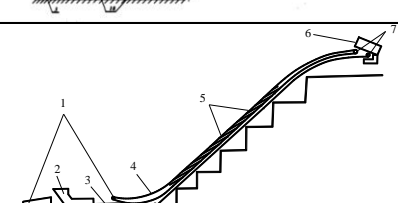
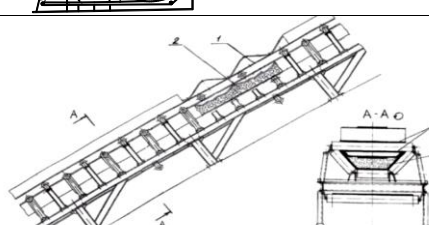
Анализ конструктивного исполнения энергоэффективных крутонаклонных конвейеров и подъемников позволяет установить большое разнообразие их конструкций для различных условий эксплуатации (табл. 1).

Методология

Безусловно, вопрос о линии наискорейшего спуска под действием силы тяжести имеет давнее происхождение. Рассматривая историографию вопроса о кривой наискорейшего спуска, обнаруживается его давнее происхождение. Галилео Галилей, впервые увидевший эту кривую, «так часто вычерчивающуюся перед глазами каждого», предложил термин «циклоида» (от греческого «циклос» – круглый), то есть происходящая от круга (рис. 1) [26].

Задача о брахистохроне (от греч. βράχιστος – кратчайший + χρόνος – время), то есть прямой наискорейшего спуска, впервые была поставлена Иоганном Бернулли в его статье, опубликованной в первом научном журнале Германии «Acta Eruditorum» в 1696 году. Новая кривая подверглась глубокому анализу, которым занимались Декарт, братья Бернулли, Лейбниц, Ньютон, Ферма и другие мыслители XVII-XVIII веков (рис. 2) [26-30].

Таблица 1. Конструктивные исполнения крутонаклонных конвейеров и подъемников
Table 1. Design of tilt conveyors and hoists

Авторские конструкции и конструкции на различных предприятиях мира	Общий вид наклонных карьерных подъемных машин и установок
Многоканатная карьерная подъемная установка с дополнительной приводной станцией	
Крутонаклонная подъемная установка для открытой горной выработки	
Подъемная установка с автономным приводом	
Автомобильно-клетевой подъемник АНК-120	
Крутонаклонный конвейер КНК-270	
Крутонаклонный ленточно-колесный конвейер для крупнокусовых грузов	
Крутонаклонный конвейер с прижимной лентой	
Линейный став крутонаклонного конвейера (конструкции ИГД УрО РАН)	

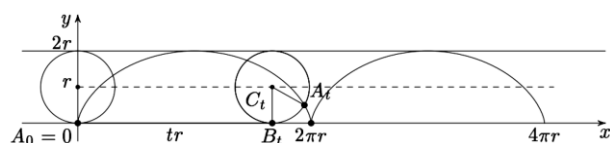


Рис. 1. Циклоида
Fig. 1. Cycloid

Авторы данного исследования не претендуют на приведение всех возможных решений, которые были получены выдающимися учеными. Самые оригинальные из них достаточно широко и подробно представлены и описаны в научных источниках. Целью данной работы является представление возможностей брахистохроны в решении прикладной задачи, которая заключается в спуске дополнительных грузов к месту ведения открытых горных работ.

Очевиден также и тот факт, что возможности брахистохроны могут использоваться в промышленном производстве с целью сокращения времени по доставке грузов и материалов, а необходимая форма направляющих фокусируется на ускорении доставки, тем самым повышении эффективности производства, производительности и безопасности труда. Примером могут служить элеваторы для подачи зерна, случаи использования спасательных средств для спасения людей, создания трапов в самолетах, при строительстве спортивных сооружений с наибольшим разгоном, а именно горнолыжных и бобслейных трасс с максимальным ускорением.

Полученные результаты и их обсуждение

Необходимо отметить, что импульсом исследования и практического применения уникального свойства брахистохроны послужила публикация Б.М. Новожилова «Исследование траектории спуска в агрегатах экстренной эвакуации космонавтов на стартовых комплексах» [31]. Проанализировав свойства и характеристики брахистохроны, автор получил расчетные зависимости и представил рекомендации, по которым может осуществляться проектирование средств экстренной эвакуации рельсового типа на основе брахистохроны. Обосновано использование агрегатов рельсового типа с вагонеткой, движущейся в рельсовой конструкции, обеспечивающей необходимую жесткость направляющей системы и возможность установки тормозных устройств в конце траектории движения. Автор отмечает от-

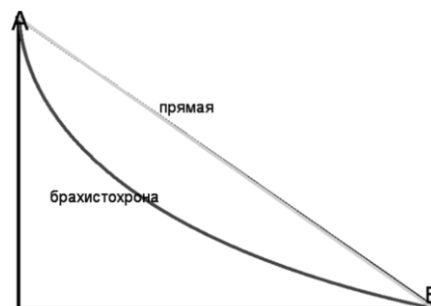


Рис. 2. Брахистохрона
Fig. 2. Brachistochrone

сутствие научных исследований по реализации данной конструктивной схемы агрегатов на базе рельсовой направляющей системы.

Для достижения поставленной задачи на начальном этапе предлагается следующее техническое решение. В качестве грузового сосуда может быть принята вагонетка грузовая шахтная узкой колеи с глухим кузовом (ГОСТ Р 55727-2013). На рис. 3 представлена возможная трасса направляющей системы спуска сосуда по нерабочему борту карьера, в табл. 2 представлены аналитические зависимости для установления основных характеристик спуска сосуда.

В табл. 3 представлены полученные расчетные значения основных характеристик для различных глубин карьеров.

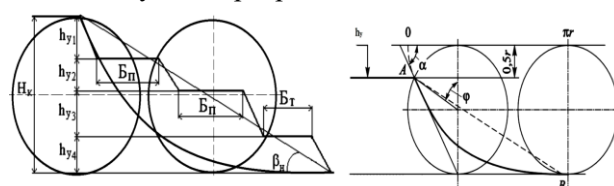


Рис. 3. Трасса направляющей системы спуска сосуда на нерабочем борту карьера
Fig. 3. Conveyance descending guide system route on a non-mining flank of the pit

Таблица 2. Аналитические зависимости для установления основных характеристик спуска сосуда на открытых горных работах
Table 2. Analytical dependencies for establishing the main characteristics of the conveyance descent in the open pit mining

Характеристика	Зависимость
Длина брахистохроны в пределах одной арки циклоиды	$S = \left -4r \cos \frac{\varphi}{2} \right _{\varphi_1}^{\varphi_2}$
Время спуска по брахистохроне	$T = \left \sqrt{\frac{r}{g}} \varphi \right _{\varphi_1}^{\varphi_2}$
Текущее значение скорости спуска	$v_{\text{брах}} = 2 \sin \frac{\varphi}{2} \sqrt{gr}$
Ускорение, вызывающее движение тела в гравитационном спуске по брахистохроне	$a_{\text{брах}} = g \cos \frac{\varphi}{2}$

Таблица 3. Основные характеристики для различных глубин карьеров (брахистохроны с углом наклона $\alpha_{нач} = 45^\circ$)

Table 3. Main characteristics for different pit depths (brachistochrone curves with slope angle $\alpha_{start} = 45^\circ$)

Глубина карьера, м	Радиус круга, м	Длина трассы по брахистохроне, м	Ориентировочная длина автомобильной трассы, м (по формуле Ржевского В.В.)	Время спуска по брахистохроне, с
200	100	282,84	3250	7,46
300	150	424,26	4913	8,99
400	200	565,68	6550	10,39

В качестве примера рассмотрим следующий вариант: в настоящее время на карьере осуществляется доработка месторождения руд ($f - 14 = 16$) открытым способом и производится строительство подземного рудника для выемки законтурных запасов. В переходный период изменена система вскрытия путем создания съезда на левом борту карьера, который обеспечивает транспортный доступ ко дну карьера и подземному наклонному съезду. Данное решение приведет к отказу использования автодороги правого борта карьера, соответственно, не предусматривается движение транспортных средств и размещения оборудования. На данном борту разместится карьерный подъемник с дополнительным оборудованием, обеспечивающим спуск карьерных грузов по трассе, максимально приближенной к брахистохроне (рис. 4).

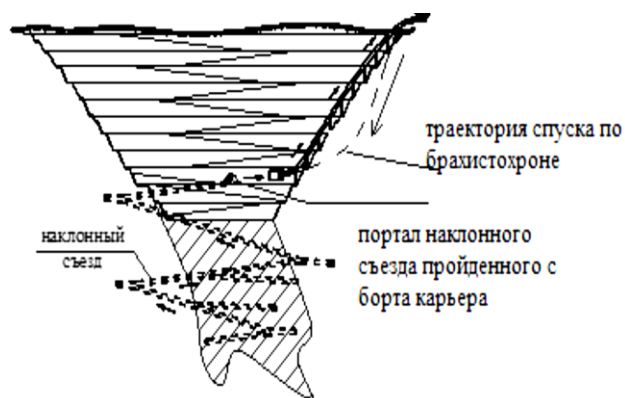


Рис. 4. Вариант размещения комплекса оборудования, обеспечивающего спуск карьерных грузов по трассе, максимально приближенной к брахистохроне

Fig. 4. An option of a layout of equipment ensuring the conveyance descent along the route approximated to the maximum to the brachistochrone

Годовой экономический эффект от внедрения комплекса Э, руб., возможно определить по следующей формуле:

$$\Xi = [C1 + E \cdot K1] - [C2 + E \cdot (K2 + K_y)],$$

где $C1, C2$ – годовые эксплуатационные расходы до внедрения новой техники и после внедрения, руб.; $K1, K2$ – стоимость производственных фондов действующего предприятия до внедрения новой техники и после, руб.; K_y – неамортизируемая часть стоимости ликвидируемых производственных фондов, руб.; E – нормативный коэффициент эффективности капиталовложений ($E = 0,12$).

Эффект от внедрения комплекса горнотранспортного оборудования, обеспечивающего спуск карьерных грузов по трассе, максимально приближенной к брахистохроне, ориентировочно составит 16,56 млн руб. в год.

Направления дальнейших исследований

В перспективе особое внимание необходимо уделить следующим вопросам: замедление и последующее торможение грузового сосуда; определение возможности использования трассы, выполненной по брахистохроне для карьеров глубиной до 200 м; внедрение системы автоматизации по управлению спуском, с возможностью использования безлюдных технологий в погрузке, доставке и выгрузке материалов; проработки вопроса использования монорельса.

Заключение

На основании результатов анализа последних научно-исследовательских работ и современного состояния открытых горных работ установлено следующее:

1. На предприятиях горного комплекса приоритетными направлениями для развития транспорта глубоких карьеров является использование инновационных подходов и транспортных средств, которые минимизируют вредное воздействие на окружающую среду в процессе эксплуатации.

2. Предлагаемый в работе вариант решения проблемы доставки дополнительных карьерных грузов позволит повысить эффективность производства, производительность и безопасность труда. В то же время сокращение затрат на транспортировку грузов приведет к экономии энергозатрат.

3. На сегодняшний день вопросы разработки технических требований к проектированию специальных видов транспорта, которые бы соответствовали условиям эксплуатации в конкретных горнотехнических условиях, требуют дополнительных решений.

Список источников

1. Галкин В.И., Шешко Е.Е. Проблемы совершенствования транспортных систем в горной промышленности России // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. №1. С. 485-507.
1. Mulukhov K.K., Beslekoeva Z.N. Retrofitting of steep angle conveyor hoist for coarse cargo in deep open pit mines // Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal). 2018. No 4. Pp. 179-188.
2. Яковлев В.Л., Тюлькин В.П., Кармаев Г.Д. Технологические аспекты применения крутонаклонных конвейеров в горнорудной промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень. М.: МГГУ-МГИ, 2002. С. 211-217.
3. Кармаев Г.Д., Глебов А.В. Выбор горнотранспортного оборудования циклично-поточной технологии карьеров. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2012. 296 с.
4. Мулухов К.К., Беслекоева З.Н. Конструкция и расчет крутонаклонного ленточно-колесного конвейера для крупнокусковых грузов и глубоких карьеров // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. № 5. С. 253-258.
5. Шешко О.Е. Эколого-экономическое сравнение применения в глубоких карьерах дизель-троллейбусов и циклично-поточной технологии // Научный вестник Московского государственного горного университета. 2013. № 5. С. 108-116.
6. Эффективность автомобильно-клетевых подъемников АНК-120 на глубоких карьерах / А.Г. Синин, В.И. Белобров, М.А. Файнблит, А.Н. Акишев // Горный журнал. 1995. № 6.
7. Кулешов А.А., Тарасов Ю.Д. Автомобильный карьерный подъемник с автономным приводом // Известия вузов. Горный журнал. 2001. №1. С. 53-56.
8. А.с. 839967 Российская Федерация, МПК В66В15/00. Шахтный многоканатный подъемник / В.И. Вавиловский, И.С. Назаренко, А.А. Сорокин, С.С. Ястребов, М.Н. Карпов, В.В. Вавиловский, Ю.В. Богданов; заявитель и патентообладатель Сибирский металлургический институт. № 2813637, заявл. 03.09.1979, опубл. 23.06.1981, Бюл. № 23.
9. Пат. 2636634 Российская Федерация, МПК В65G 17/12, В65G 37/00, В65G 47/58, В65B 15/08, E21C 41/26, E21C 47/00, E21F 13/04. Крутонаклонная конвейерная установка для открытой горной выработки / Верре Клаус, Вольперс Франц М., Папажевски Детлеф, Раац Виктор; заявитель и патентообладатель ТиссенКрупп Индастриал Солюшенз АГ. № 2014132232, заявл. 30.01.2013, опубл. 24.11.2017, Бюл. № 3.
10. Пат. 2069637 Российская Федерация, МПК В66В 19/06. Устройство для транспортирования грузов / А.Ю. Макеев, А.П. Комиссаров; заявитель и патентообладатель Уральский горный институт им. В.В. Вахрушева. № 93008412, заявл. 09.02.1993, опубл. 20.04.1995.
11. Патент на полезную модель 186195 РФ. Карьерное подъемное устройство / А.А. Гоготин, В.Н. Калмыков, С.Е. Гавришев, К.В. Бурмистров. Опубл. 11.01.2019, Бюл. №2.
12. Обоснование технологических схем транспортирования горной массы с применением карьерных подъемников при разработке месторождений открытоподземным способом / С.Е. Гавришев, К.В. Бурмистров, С.Н. Корнилов, Н.Г. Томилина // Горный журнал. 2016. №5 (2226). С. 41-47.
13. Обоснование целесообразности применения крутонаклонных подъемников в карьере при комбинированном способе разработки месторождения / С.Е. Гавришев, К.В. Бурмистров, В.А. Кидяев, Н.Г. Томилина // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. №6. С. 165-172.
14. Грайнахер Й., Барчет К., Доберт М. Проектирование и монтаж вертикального конвейера на шахте «Уайт каунти» // Глюкауф. 2004. № 2(3). С. 16-23.
15. Галкин В.И., Дмитриев В.Г. Трубчатые конвейеры для горной промышленности // Горное оборудование и электромеханика. 2009. № 1. С. 39-46.
16. Анализ конструкций крутонаклонных конвейеров для карьеров / Е.Д. Николаев и др. // Горный журнал. 1998. № 11-12. С. 62-25.
17. Картавый А.Н. Крутонаклонные ленточные конвейеры для горной промышленности // Горное оборудование и электромеханика. 2006. № 10. С. 22-26.
18. Картавый А.Н. Проблемы применения различных типов крутонаклонных ленточных конвейеров // Тяжелое машиностроение. 2007. № 3. С. 31-34.
19. Шешко Е.Е. Проблемы крутонаклонных ленточных конвейеров с прижимной лентой // Горные машины: сб. науч. тр. Отдельный выпуск ГИАБ № 8. М.: Мир горной книги, 2008. 384 с.
20. Картавый А.Н. Перспективы применения крутонаклонных конвейеров с прижимной лентой при ЦПТ // Горный журнал. № 6. 2003. С. 52-56.
21. Николаев Е.Д., Назаров А.В. Новая технология разработки глубоких карьеров с применением модернизированных крутонаклонных конвейеров // Недропользование XXI век. 2010. № 2. С. 62-64.

22. Котяшев А.А., Каледин А.В. Применение ленточных крутонаклонных конвейеров для транспортирования горной массы // Горный журнал. 1990. № 5. С. 61-63.
23. Великанов В.С., Гуров М.Ю. Развитие научно-методологических основ совершенствования карьерных экскаваторов на базе нечетко-множественного подхода. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2018. 217 с.
24. Галкин В.И., Дмитриев В.Г. Трубчатые конвейеры для горной промышленности // Горное оборудование и электромеханика. 2009. №1.
25. Берман Г.Н. Циклоида. М.: Наука, 1980. 112 с.
26. Иванов А.А., Лукьянов А.А. Еще о брахистохроне и таутохроне // Физическое образование в вузах. 1999. Т. 5. № 3. С. 54-61.
27. Каганов В.И. О двух великих швейцарских математиках Бернулли – Якобе и Иоганне / Сайт электронного журнала. Научно-популярный журнал для юношества «Страна знаний». № 2. 2016.
28. Зароднюк А.В., Черкасов О.Ю. Качественный анализ оптимальных траекторий движения материальной точки в сопротивляющейся среде и задача о брахистохроне // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2015. № 1. С. 41-49.
29. Белоцерковская И.Е., Ефимова Э.В., Втюрин М.Ю. Решение задачи о брахистохроне с помощью электронных таблиц в рамках программы дополнительного образования // Информатизация образования: проблемы и перспективы: сб. науч. ст. IV Всерос. науч.-практ. интернет-конференции, посвященной памяти Д.Ш. Матроса / под общей ред. Г.Б. Поднебесовой. Челябинск: Изд-во Южно-Урал. гос. гуман.-пед. ун-та, 2018. С. 8-18.
30. Новожилов Б.М. Исследование траектории спуска в агрегатах экстренной эвакуации космонавтов на стартовых комплексах / Б.М. Новожилов // Инженерный журнал: наука и инновации. 2019. № 10 (94). С. 1-13.
4. Karmaev G.D., Glebov A.V. *Vybor gornotransportnogo oborudovaniya tsiklichno-potochnoy tekhnologii karerov* [The choice of mining and transport equipment for cyclic-and-continuous technology of open pits]. Yekaterinburg: Mining Institute of the Ural Branch, the Russian Academy of Sciences, 2012, 296 p. (In Russ.)
5. Mulukhov K.K., Beslekoeva Z.N. Design and calculation of a steeply inclined wheel-belt conveyor for large-sized cargo and deep pits. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)* [Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)], 2012, no. 5, pp. 253-258. (In Russ.)
6. Sheshko O.E. Ecological and economic comparison of the use of diesel trolley cars and cyclic-and-continuous technology in deep pits. *Nauchnyi vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* [Scientific Bulletin of Moscow State Mining University], 2013, no. 5, pp. 108-116. (In Russ.)
7. Sisin A.G., Belobrov V.I., Fainblit M.A., Akishev A.N. Efficiency of automobile cage hoists ANK-120 in deep pits. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 1995, no. 6. (In Russ.)
8. Kuleshov A.A., Tarasov Yu.D. Self-driven open pit automobile hoist. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal* [News of Higher Education Institutions. Mining Journal], 2001, no. 1, pp. 53-56. (In Russ.)
9. Vavilovsky V.I., Nazarenko I.S., Sorokin A.A., Yastrebov S.S., Karpov M.N., Vavilovsky V.V., Bogdanov Yu.V. *Shakhtnyi mnogokanatnyi podemnik* [Mine multi-rope hoist]. Author's certificate of the Russian Federation, no. 839967, 1981.
10. Werre Klaus, Wolpers Franz M., Papagewski Detlef, Raaz Viktor. *Krutonaklonnaya konveiernaya ustanovka dlya otkrytoi gornoi vyrabotki* [Steep conveying installation for open-cast mining]. Patent RU, no. 2636634, 2017.
11. Makeev A.Yu., Komissarov A.P. *Ustroistvo dlya transportirovaniya gruzov* [Device for cargo handling]. Patent RU, no. 2069637, 1995.
12. Gogotin A.A., Kalmykov V.N., Gavrishchev S.E., Burmistrov K.V. *Karernoe podemnoye ustroystvo* [Open pit hoist]. Utility model patent RU, no. 186195, 2019.
13. Gavrishchev S.E., Burmistrov K.V., Kornilov S.N., Tomilina N.G. Rationale for process flow charts of rock mass transportation using pit hoists in open pit and underground mining. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2016, no. 5 (2226), pp. 41-47. (In Russ.)
14. Gavrishchev S.E., Burmistrov K.V., Kidyaev V.A., Tomilina N.G. Rationale for using steeply inclined conveyors in a pit, when applying a combined method of deposit development. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)* [Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)], 2012, no. 6, pp. 165-172. (In Russ.)
15. Greinacher J., Barchet K., Dobert M. Design and installation of a vertical conveyor at the White County mine. *Glueckauf*, 2004, 2(3), 16-23.

References

1. Galkin V.I., Sheshko E.E. Problems of improving transport systems in the mining industry in Russia. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin], 2011, no. 1, pp. 485-507. (In Russ.)
2. Mulukhov K.K., Beslekoeva Z.N. Retrofitting of steep angle conveyor hoist for coarse cargo in deep open pit mines. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)* [Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)], 2018, no. 4, pp. 179-188. (In Russ.)
3. Yakovlev V.L., Tyulkin V.P., Karmaev G.D. Technological aspects of the use of steeply inclined conveyors in the mining industry. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin]. Moscow: Moscow State Mining University-Moscow Mining Institute, 2002, pp. 211-217. (In Russ.)

16. Galkin V.I., Dmitriev V.G. Tubular conveyors for the mining industry. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika* [Mining Equipment and Electromechanics], 2009, no. 1, pp. 39-46. (In Russ.)
17. Nikolaev E.D. et al. Design analysis of steeply inclined conveyors for quarries. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 1998, no. 11-12, pp. 62-25. (In Russ.)
18. Kartavyi A.N. Steeply inclined belt conveyors for the mining industry. *Gornoe oborudovaniye i elektromekhanika* [Mining Equipment and Electromechanics], 2006, no. 10, pp. 22-26. (In Russ.)
19. Kartavyi A.N. Problems of applying various types of steeply inclined belt conveyors. *Tyazheloe mashinostroyeniye* [Heavy Engineering], 2007, no. 3, pp. 31-34. (In Russ.)
20. Sheshko E.E. *Problemy krutonaklonnykh lentochnykh konveyerov s prizhimnoy lentoy* [Problems of steeply inclined belt conveyors with a pressure belt]. Mining Machines: Collection of papers. Special issue of Mining Information and Analytical Bulletin No. 8. Moscow: Books on mining, 2008, 384 p. (In Russ.)
21. Kartavyi A.N. Prospects for the use of steeply inclined conveyors with a pressure belt in cyclic-and-continuous technology. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2003, no. 6, pp. 52-56. (In Russ.)
22. Nikolaev E.D., Nazarov A.V. New technology for the development of deep pits using modernized steeply inclined conveyors. *Nedropolzovanie XXI vek* [Sub-surface use in the 21st century], 2010, no. 2, pp. 62-64. (In Russ.)
23. Kotyashev A.A., Kaledin A.V. The use of steeply inclined belt conveyors for transporting rock mass. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 1990, no. 5, pp. 61-63. (In Russ.)
24. Velikanov V.S. Gurov M.Yu. *Razvitie nauchno-metodologicheskikh osnov sovershenstvovaniya karernykh ekskavatorov na baze nechetko-mnozhestvennogo podkhoda* [Development of the scientific and methodological framework for improving mining excavators based on a fuzzy-multiple criteria approach]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2018, 217 p. (In Russ.)
25. Galkin V.I., Dmitriev V.G. Tubular conveyors for the mining industry. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika* [Mining Equipment and Electromechanics], 2009, no. 1. (In Russ.)
26. Berman G.N. *Tsikloida* [Cycloid]. Moscow: Science, 1980, 112 p. (In Russ.)
27. Ivanov A.A., Lukyanov A.A. More about brachistochrone and tautochrone. *Fizicheskoe obrazovanie v vuzakh* [Physics at universities], 1999, vol. 5, no. 3, pp. 54-61. (In Russ.)
28. Kaganov V.I. About two great Swiss mathematicians Bernoulli - Jacob and Johann. *Nauchno-populyarnyi zhurnal dlya yunoshestva «Strana znanii»* [Popular science journal for the youth Country of Knowledge], 2016, no. 2.
29. Zarodnyuk A.V., Cherkasov O.Yu. Qualitative analysis of optimal motion trajectories of a material point in resisting medium and the brachistochrone problem. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Theory and Control Systems], 2015, no. 1, pp. 41-49. (In Russ.)
30. Belotserkovskaya I.E., Efimova E.V., Vtyurin M.Yu. Solving the brachistochrone problem using spreadsheets in the framework of the extended education curriculum. *Informatizatsiya obrazovaniya: problemy i perspektivy: sbornik nauchnykh statey IV Vserossiiskoi nauch.-praktich. internet-konferentsii, posvyashchennoi pamyati D.Sh. Matrosa. Pod obshchey red. G.B. Podnebesovoy* [Informatization of education: problems and prospects: collection of research papers of the 4th All-Russian Scientific and Practical Internet Conference dedicated to the memory of D.Sh. Matros. Ed. by G.B. Podnebesova]. Chelyabinsk: Publishing House of South Ural State University of Humanities and Pedagogy, 2018, pp. 8-18. (In Russ.)
31. Novozhilov B.M. Study of the descent trajectory in astronaut emergency evacuation units at launch complexes. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovations], 2019, no. 10(94), pp. 1-13. (In Russ.)

Поступила 26.09.2022; принята к публикации 19.10.2022; опубликована 22.12.2022
Submitted 26/09/2022; revised 19/10/2022; published 22/12/2022

Великанов Владимир Семенович – доктор технических наук, профессор,
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Екатеринбург, Россия. Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия.
Email: rzhik_00@mail.ru. ORCID 0000-0001-5581-2733

Дёрина Наталья Владимировна – кандидат филологических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: nataljapidckaluck@yandex. ORCID 0000-0002-0613-0864

Кочержинская Юлия Витальевна – кандидат технических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: y.kocherzhinskaya@mail.ru. ORCID 0000-0001-5779-2588

Мамай Никита Валерьевич – студент, Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия.

Логунова Татьяна Валерьевна – магистрант, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.

Vladimir S. Velikanov – DrSc (Eng.), Professor,
Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia.
Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia.
Email: rizhik_00@mail.ru. ORCID 0000-0001-5581-2733

Natalja V. Dyorina – PhD (Philology), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: nataljapidckaluck@yandex. ORCID 0000-0002-0613-0864

Yuliya V. Kocherzhinskaya – PhD (Eng.), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: y.kocherzhinskaya@mail.ru. ORCID 0000-0001-5779-2588

Nikita V. Mamay – student,
Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia.

Tatiana V. Logunova – master degree student,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

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

УДК 622.271.3

DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-4-15-25



АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОВЕТРИВАНИЯ ГЛУБОКИХ КАРЬЕРОВ

Сергеев В.В.¹, Герасименко Т.Е.¹, Евдокимов С.И.¹, Герасименко Н.П.²

¹ Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет),
Владикавказ, Россия

² Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия

Аннотация. Постановка задачи. Повышение эффективности проветривания карьеров и ликвидация застойных зон актуализируются при увеличении глубины открытых горных работ. Повысить эффективность проветривания возможно интенсификацией воздушных потоков в карьерном пространстве за счет реализации технических решений, направленных на вовлечение естественных воздушных потоков в локальные потоки, создаваемые работой вентиляционных установок. **Цель работы.** Разработка технического решения, обеспечивающего повышение эффективности и упрощение проветривания карьеров, снижение энергетических и материальных затрат, а также исследование эффективности разработанного способа с помощью компьютерного моделирования. **Новизна.** По сравнению с известными аналогами в разработанном способе вентиляционную установку размещают на дне карьера, создавая с ее помощью направленный вертикальный поток, а также вдоль бортов карьера, создавая с их помощью закрученный по спирали воздушный поток, скорость которого регулируют изменением расхода и напора воздуха вентиляционными установками. **Результат.** При реализации разработанного способа создаются все условия для поддержания движения воздушных масс по всей глубине карьера, их функционирование и регулирование и, следовательно, эффективное проветривание в зависимости от места и глубины проведения горных работ. **Практическая значимость.** Полученные с помощью компьютерного моделирования результаты скоростей воздушных потоков позволяют оценить эффективность проветривания карьера при различном количестве и мощности вентиляционных установок и подобрать оптимальные режимы для реальных условий разработки месторождений открытым способом.

Ключевые слова: карьер, способы проветривания, интенсификация проветривания, эффективность проветривания, оптимальные условия проветривания

© Сергеев В.В., Герасименко Т.Е., Евдокимов С.И., Герасименко Н.П., 2022

Для цитирования

Анализ технических решений для повышения эффективности проветривания глубоких карьеров / Сергеев В.В., Герасименко Т.Е., Евдокимов С.И., Герасименко Н.П. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №4. С. 15-25. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-15-25>



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

ANALYSIS OF TECHNICAL SOLUTIONS FOR INCREASING EFFICIENCY OF VENTILATION OF DEEP OPEN PITS

Sergeev V.V.¹, Gerasimenko T.E.¹, Evdokimov S.I.¹, Gerasimenko N.P.²

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

² Kuban State University, Krasnodar, Russia

Abstract. Problem Statement. An increase in efficiency of open pit ventilation and the elimination of stagnant zones are of particular relevance with an increase in depth of open pit mining. It is possible to increase efficiency of ventilation by intensifying air flows in the pit space and implementing technical solutions aimed at involving natural air flows into local flows created by the operation of ventilation units. **Objective.** The research is aimed at developing a technical solution that improves efficiency and simplifies the ventilation of open pits, reduces energy and material costs, and studying efficiency of the developed method using a computer simulation. **Originality.** Compared to the known similar solutions, the ventilation units in the developed method are placed at the bottom of the open pit, creating a directed vertical flow, and along the sides of the pit, creating a spiral air flow, whose speed is controlled by changing the air flow rate and pressure by the ventilation units. **Findings.** When implementing the developed method, all conditions are created to maintain the movement of air masses throughout the depth of the open pit, their functioning and control, and, consequently, efficient ventilation depending on the place and depth of mining. **Practical Relevance.** The computer simulation of air flow velocities contributes to evaluating efficiency of the open pit ventilation with a various number and power of ventilation units, and to selecting the optimal modes for actual conditions of open pit mining.

Keywords: open pit, ventilation methods, ventilation intensification, ventilation efficiency, optimal ventilation conditions

For citation

[Sergeev V.V.], Gerasimenko T.E., Evdokimov S.I., Gerasimenko N.P. Analysis of Technical Solutions for Increasing Efficiency of Ventilation of Deep Open Pits. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 4, pp. 15-25. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-15-25>

Введение

Безопасности условий труда рабочих и надежности работы технологического оборудования уделяется большое внимание при осуществлении производственных процессов, в частности при разработке месторождений открытым способом [1, 2]. Основным обязательным нормативным документом для выполнения работ всеми организациями и регламентирующим деятельность в этой области являются «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых», утвержденные Приказом Ростехнадзора от 08.12.2020 №505, вступившим в силу 1 января 2021 г.

В открытых карьерах основным источником пыли являются взрывные работы. Их вклад в пылеобразование составляет $\approx 90-96\%$ при интенсивности пылевыведения $500-4200 \text{ мг/м}^3$ [3]. Повышенные концентрации пыли и вредных газов могут быть опасными как для работников карьеров, так и для надежной работы оборудования. Поэтому успешное решение вопросов борьбы с пылью и газами в карьерах является весьма актуальной задачей.

Повышения эффективности проветривания глубоких карьеров и ликвидация застойных зон актуализируются при увеличении глубины открытых горных работ. Повысить эффективность проветривания возможно интенсификацией воздушных потоков в карьерном пространстве за счет использования различных технических решений, направленных на вовлечение естественных воздушных потоков в локальные искусственные потоки, создаваемые работой вентиляционных установок. Для максимально эффективного объединения естественных условий и искусственных воздушных потоков необходимо учитывать микроклимат в атмосфере карьеров, а именно температуру воздуха, его влажность, ветровые потоки, а также сезонные климатические условия, преобладающие в том или ином регионе.

На основании анализа [4-12], проведенного авторами статьи, установлено, что наиболее эффективной схемой проветривания карьера является использование струй воздуха, создаваемых мобильными устройствами, легко перемещающимися в карьерном пространстве, что позволяет увеличить объем воздуха, вовлекаемого в турбулентный поток, за счет эффекта резонанса вихревых потоков.

Технические и технологические разработки

При разработке технических решений важным этапом является анализ источников технической информации, наиболее представительным и исчерпывающим источником которой является патентная информация. Доступ к патентным документам осуществляется через государственные патентные ведомства, находящиеся в открытом доступе. Анализ патентно-технической информации по Российской Федерации, КНР, США и Германии показал, что практически все способы проветривания глубоких карьеров и устройства для их осуществления имеют целью повысить эффективность проветривания рабочего пространства с минимальными энергетическими и материальными затратами, при обеспечении контроля и управляемости вихревой вентиляционной воронкой [13-17]. Причем Российская Федерация является лидером в разработке способов проветривания глубоких карьеров и устройств для их осуществления. Это подтверждает, что наша страна занимает ведущие позиции в технологиях разработки месторождений полезных ископаемых и уделяет существенное внимание безопасности условий труда рабочих.

В Северо-Восточном федеральном университете им. М.К. Аммосова разработан способ проветривания карьера [13], в котором проветривание осуществляют за счет следующей последовательности действий (рис. 1):

- создают восходящий вихревой столб путем расположения вентиляционных установок вокруг рабочей зоны карьера и направляют воздушные потоки вентиляционных струй к рабочей зоне;

- формируют восходящий воздушный поток в центральной части рабочей зоны в виде вихревого столба вращения путем закручивания его по периметру потоками вентиляционных струй;

- направляют вентиляционные струи внутрь рабочей зоны по касательной к окружности основания вихревого столба, диаметр которого регулируют изменением угла наклона осей вентиляционных установок относительно столба;

- контролируют скорость вращения столба изменением производительности вентиляционных установок;

- изменяют плотность воздуха в вентиляционных струях нагреванием за счет сжигания горючего топлива в реактивных двигателях либо нагреванием и увлажнением с помощью подачи горячего пара и создания водяного тумана пушками.

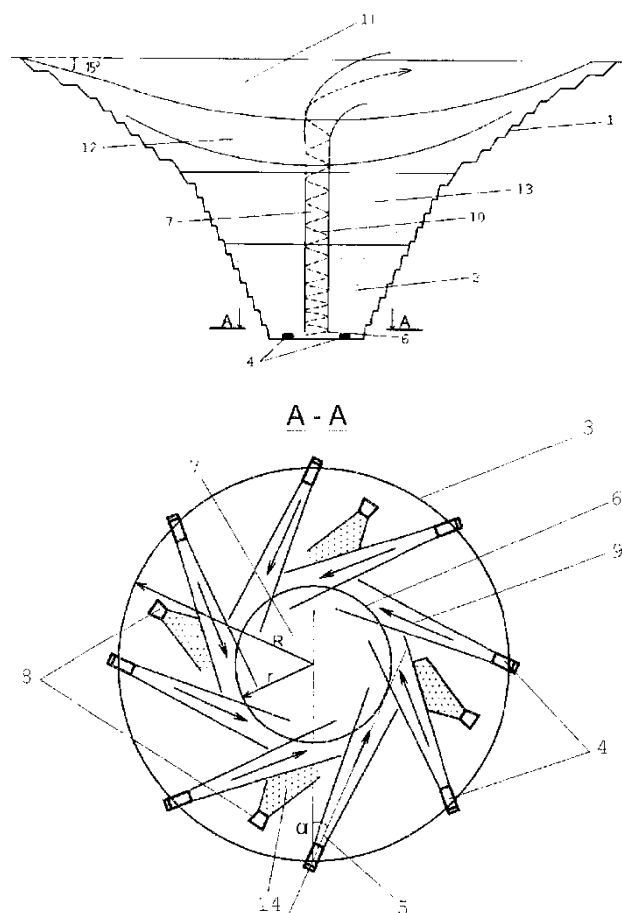


Рис. 1. Схема проветривания карьера: 1 – карьер; 2 – рабочая зона; 3 – контур установки вентиляторов; 4 – вентиляционные установки; 5 – продольная ось вентиляционных струй; 6 – основание вихревого столба; 7 – вихревой столб; 8 – водяная пушка; 9 – вентиляционные струи; 10 – спираль вихревого столба; 11 – зона ветровой активности; 12 – зона рециркуляции; 13 – инверсионная пробка; 14 – струи пара

Fig. 1. Open pit ventilation process flow chart: 1 is an open pit; 2 is an operating area; 3 is a line of installed fans; 4 is ventilation units; 5 is a longitudinal axis of air flows; 6 is a base of the rotating air column; 7 is a rotating air column; 8 is a water cannon; 9 is air flows; 10 is a spiral of the rotating air column; 11 is a wind activity zone; 12 is a recirculation zone; 13 is an inversion seal; 14 is steam jets

Изменение производительности вентиляционных установок выполняют одновременно либо попарно с противоположных сторон периметра рабочей зоны. До начала проветривания обеспыливают площадь основания вихревого столба орошением воды на пылящиеся поверхности и ее замораживанием.

Проанализировав последовательность существенных признаков технического решения [13], авторы статьи пришли к выводу, что при реализации данного способа нет возможности получить технический результат из-за известных физических явлений, основанных на законах аэродинамики и сохранения массы. Если создавать восходящий вихревой поток только в центральной части карьера, то из-за неразрывности потока воздух на дне карьера должен пополняться воздухом с бортов карьера. Так как воздух спускается вниз, то он должен закрутиться против часовой стрелки из-за сил Кориолиса. Для этого должны быть созданы условия, побуждающие это движение воздуха, которые отсутствуют в данном способе. Поэтому воздух будет поступать с бортов карьера, но не по всей его глубине, а лишь с небольшой высоты от дна, а вертикальный вихревой столб будет рассеиваться, не достигнув поверхности карьера, и стекать вниз, вовлекаясь в круговорот. То есть имеет место перемешивание воздуха в нижней части карьера, но не проветривание карьера по всей его глубине.

В способе проветривания карьера в [13] создается попытка вызвать такое природное явление, как циклон, внутри которого формируется восходящий воздушный поток на максимально возможную высоту. При этом осуществляют подогрев вентиляционных струй, направленных по касательной к окружности вихревого столба, а также нагревают путём неконтролируемого сжигания горючих материалов внутри основания вихревого столба. Этими усилиями создаются условия для облегчения создания вихревого столба с подсосом воздуха с бортов карьера. Этому же способствует и естественный температурный градиент, то есть повышение температуры на 1°C на каждые 100 м, что, в конечном счете, например, на глубине 600 м создает температуру пород на 6°C выше, чем на поверхности. Для облегчения воздуха и повышения высоты вертикального столба применяют еще и впрыскивание водяного тумана в зону основания вертикального столба, но это эффективно только для пылеподавления, так как из водяного тумана образуются либо капли – в летнее время, либо снежинки – в зимнее время, центром осаждения или кристаллизации которых являются частицы пыли. Однако для создания вертикального столба это явление имеет противоположный эффект, так как воздушные струи охлаждаются за счет дополнительного испарения капель или снежинок. Всех используемых мер недостаточно для создания восходящего воздушного потока на всю глубину карьера, например 800 м, поэтому воздушный поток рассеется на некоторой глубине, разнеся снег по бор-

там карьера зимой или капли воды летом, благодаря центробежным силам. Таким образом, в данном способе имеем практически полное пылеподавление с частичной нейтрализацией вредных газов с циркуляцией воздушных масс на нижних горизонтах карьера – снежный фонтан внутри карьера, но не его эффективную вентиляцию. В летнее время будем иметь внутри карьера дождевой фонтан с увлажнением бортов карьера на уровне рассеивания вертикального воздушного потока. Воздушные массы, освободившись от снега или водяных капель, спускаются вниз, где снова вовлекаются в круговорот.

Известен способ проветривания [14], согласно которому проветривание карьера происходит за счет обеспечения создания непрерывного потока воздуха вдоль восходящей конической винтовой линии (**рис. 2**), на которой расположены вентиляционные установки. Проветривание карьера при этом осуществляется, во-первых, благодаря выносу непосредственно струей, создаваемой установками, во-вторых, вследствие подсоса воздуха в центре карьера и выброса на периферии, которые возникают из-за разности давлений, обусловленных вращательным движением воздуха во всем объеме карьера.

При этом, как видно на **рис. 2**, поток закручивается против часовой стрелки с выносом наружу. Однако закрученные внешние слои воздуха, движущиеся против часовой стрелки в северном полушарии Земли, образуют циклон, в котором внешние слои из-за действия сил Кориолиса перемещаются внутрь и, достигнув дна, устремляются вертикально вверх, а не наоборот. То есть все действия вентиляторных установок направлены на создание противотока естественным процессам. Такое явление наблюдается в Санкт-Петербурге, когда вода из Финского залива движется навстречу течению Невы, поднимая в ней уровень воды и затопливая город и окрестности. Таким образом, данное техническое решение не только не обеспечивает проветривание карьера, но даже не обеспечивает перемешивание воздушных масс внутри карьера, а запирает воздух внутри него.

В разработанном Красноярской государственной академией цветных металлов и золота способе проветривания глубоких карьеров [15] нагнетание или отсасывание воздуха осуществляют через подземные горные выработки, а воздухообмен между атмосферой карьера и окружающей средой осуществляют по трубопроводам легче воздуха, которые перемещают в выработанном пространстве карьера (**рис. 3**).

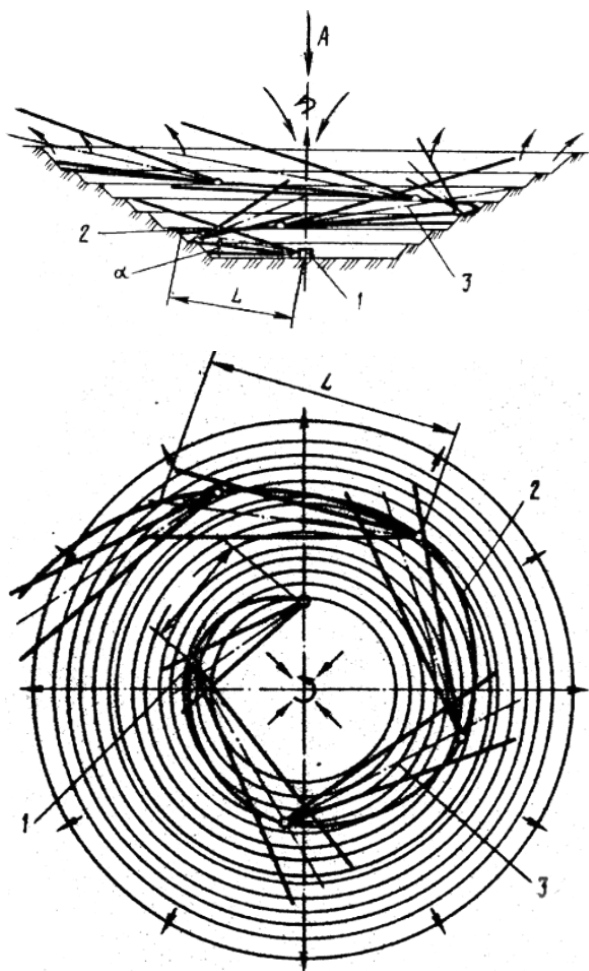


Рис. 2. Схема проветривания карьера:

- 1 – вентиляционные установки;
- 2 – восходящая винтовая линия;
- 3 – воздушные струи

Fig. 2. Open pit ventilation process flow chart:

- 1 is ventilation units; 2 is an upstream helical line; 3 is air jets

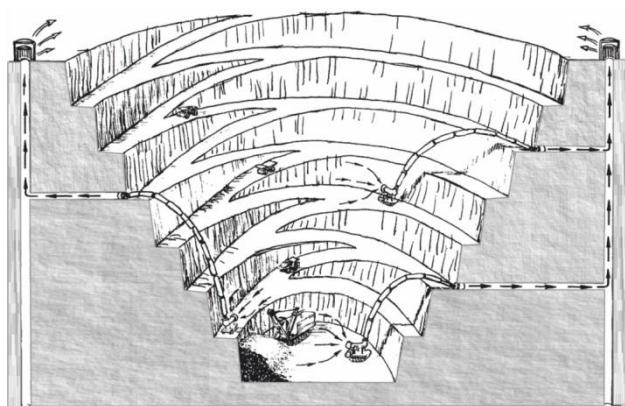


Рис. 3. Схема проветривания карьера через подземные горные выработки

Fig. 3. Open pit ventilation process flow chart using underground mining workings

Эффективность воздействия вентиляционной системы на атмосферу карьера осуществляется за счет перемещения трубопровода по рабочим площадкам с помощью самоходного устройства. Несмотря на высокую эффективность проветривания, этот способ имеет существенный недостаток, а именно сложность реализации. Это связано с тем, что подготовительный этап требует проведения дополнительных дорогостоящих горных работ, таких как проходку и поддержание стволов вокруг карьера и штолен для связи выработанного пространства карьера со стволами. Следует отметить, что данное техническое решение эффективно в основном при ликвидации локальных очагов пылевыведения, таких как взрывные работы, буровые работы, уборка горной массы, для чего воздухоприемные устройства устанавливают на шасси автомобиля. При этом общая запыленность карьера от других, не охваченных источников пылевыведения данным способом не контролируется.

Еще одной отечественной разработкой стал способ искусственной вентиляции глубоких карьеров [16], в котором на одном из верхних горизонтов размещают вентиляционную установку для создания наклонной нисходящей струи (рис. 4). Внизу карьера размещают вентиляционную установку для создания восходящей струи. В зоне действия струй устанавливают плавучие надувные заграждения, удерживаемые и управляемые с земли тросами посредством передвижных лебедок. Одно надувное заграждение заполняют гелием для поддержания необходимого избыточного давления газа, а второе надувное заграждение заполняют горячим воздухом. Регулирование скорости вентиляционного потока осуществляют изменением угла наклона и высоты расположения заграждений.

Этот способ, так же как и предыдущий, требует дополнительных материальных затрат на изготовление довольно больших надувных заграждений, заполняемых гелием и горячим воздухом, поддержания их заданного положения в пространстве над карьером лебедками. Еще одним недостатком является образование застойных зон, связанных с геометрией карьера. Округлая, а не прямоугольная форма карьера при подобном формировании воздушных потоков не позволяет достичь заявленного данного технического результата по эффективности проветривания. Кроме того, на эффективность проветривания сильно влияет направление естественных атмосферных воздушных потоков над

карьером. Наибольший эффект будет при попутном восходящей струе ветре, а при встречном или боковом ветре струя будет затормаживаться или сноситься в сторону от заграждения, что приведет к потере эффективности проветривания по данному способу.

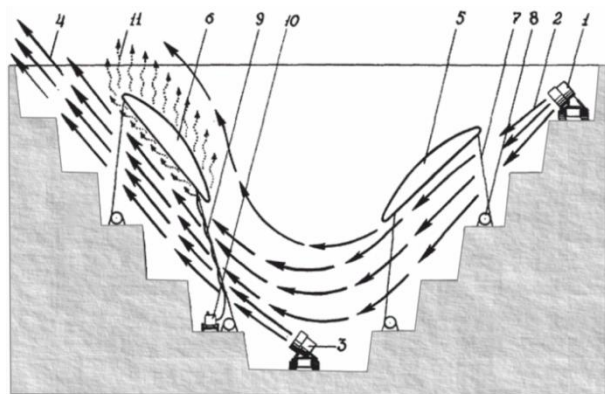


Рис. 4. Схема искусственной вентиляции глубоких карьеров: 1, 3 – вентиляционные установки; 2 – нисходящая воздушная струя; 4 – восходящая воздушная струя; 5, 6 – плавучие надувные заграждения; 7 – тросы; 8 – передвижные лебедки; 9 – воздуховод; 10 – калорифер; 11 – восходящие конвективные потоки

Fig. 4. Deep open pit forced ventilation process flow chart: 1, 3 are ventilation units; 2 is a downstream air jet; 4 is an upstream air jet; 5, 6 are floating inflatable barriers; 7 is ropes; 8 is travelling hoists; 9 is an air duct; 10 is a heater; 11 is downstream convective flows

Результаты исследования и их обсуждение

Проанализировав недостатки технических решений, был разработан способ проветривания карьера [17], согласно которому на уступах 2 вдоль бортов карьера и на дне 3 карьера вдоль его центральной оси устанавливают вентиляционные установки 1 (рис. 5). Количество установок 1 зависит от глубины и внутреннего объема карьера. Вдоль бортов 2 карьера создают антициклон (рис. 5, а), закручивая воздушные массы по часовой стрелке, а в центре карьера создают направленный нисходящий вертикальный поток, создавая повышенное давление на дне 3 карьера. При создании циклона (рис. 5, б) воздушный поток закручивают против часовой стрелки, а в центре карьера создают направленный восходящий вертикальный поток путем создания пониженного давления на дне 3 карьера. Для корректировки вентиляционной ситуации в карьере, изменяющейся с изменением геометрии карьера, а именно глубины, диаметра, все вентиляцион-

ные установки 1 для лучшей мобильности размещают на прицепе 4 тягача 5 (рис. 5, в), позволяющего легко перемещать их в нужное место.

Для создания вертикально направленного потока вентиляционную установку 1 размещают на раме 6, которую устанавливают вертикально с помощью подъемного механизма 7 (рис. 5, г). Во избежание разрушения поверхности карьера под сопло воздуходувной установки укладывают постель 8. Для снижения материальных затрат на осуществление способа максимально сокращают коммуникации на прокладывание кабелей или трубопроводов для снабжения вентиляционных установок 1 электроэнергией или топливом за счет снабжения установок блоком питания 9. В качестве питания может быть использована передвижная электростанция для электрических вентиляторов или топливный бак для реактивных или турбореактивных двигателей. Регулирование скорости направленного воздушного потока, омывающего борта карьера, производят за счет изменения расхода и напора воздуха вентиляционными установками 1.

Данный способ по сравнению с прототипом позволяет исключить образование застойных зон, что существенно повышает эффективность проветривания. Целью разработки данного способа является создание в необходимом месте и в нужное время таких природных явлений, как циклон или антициклон и управление ими. Применение циклона более эффективно при удалении вредных веществ и пыли с нижних горизонтов, так как при циклоне закрученные против часовой стрелки внешние потоки воздуха, омывая уступы карьера, опускаются на дно, где формируется восходящий вертикальный столб воздуха. Применение антициклона более эффективно при удалении загрязнений с верхних горизонтов, так как закрученные по часовой стрелке внешние воздушные потоки, омывая уступы карьера, поднимаются с его дна, где формируется нисходящий вертикальный столб воздуха. При этом создаются все условия для поддержания движения воздушных масс по всей глубине карьера, их функционирование и регулирование и, следовательно, эффективное проветривание в зависимости от места и глубины проведения горных работ. Без раскручивания массы воздуха вдоль бортов карьера и принудительного создания управляемого восходящего (при циклоне) или нисходящего (при антициклоне) воздушного потока в центре карьера это явление невозможно. Подтверждает вышесказанное эпюра скоростей масс воздуха внутри карьера (рис. 6).

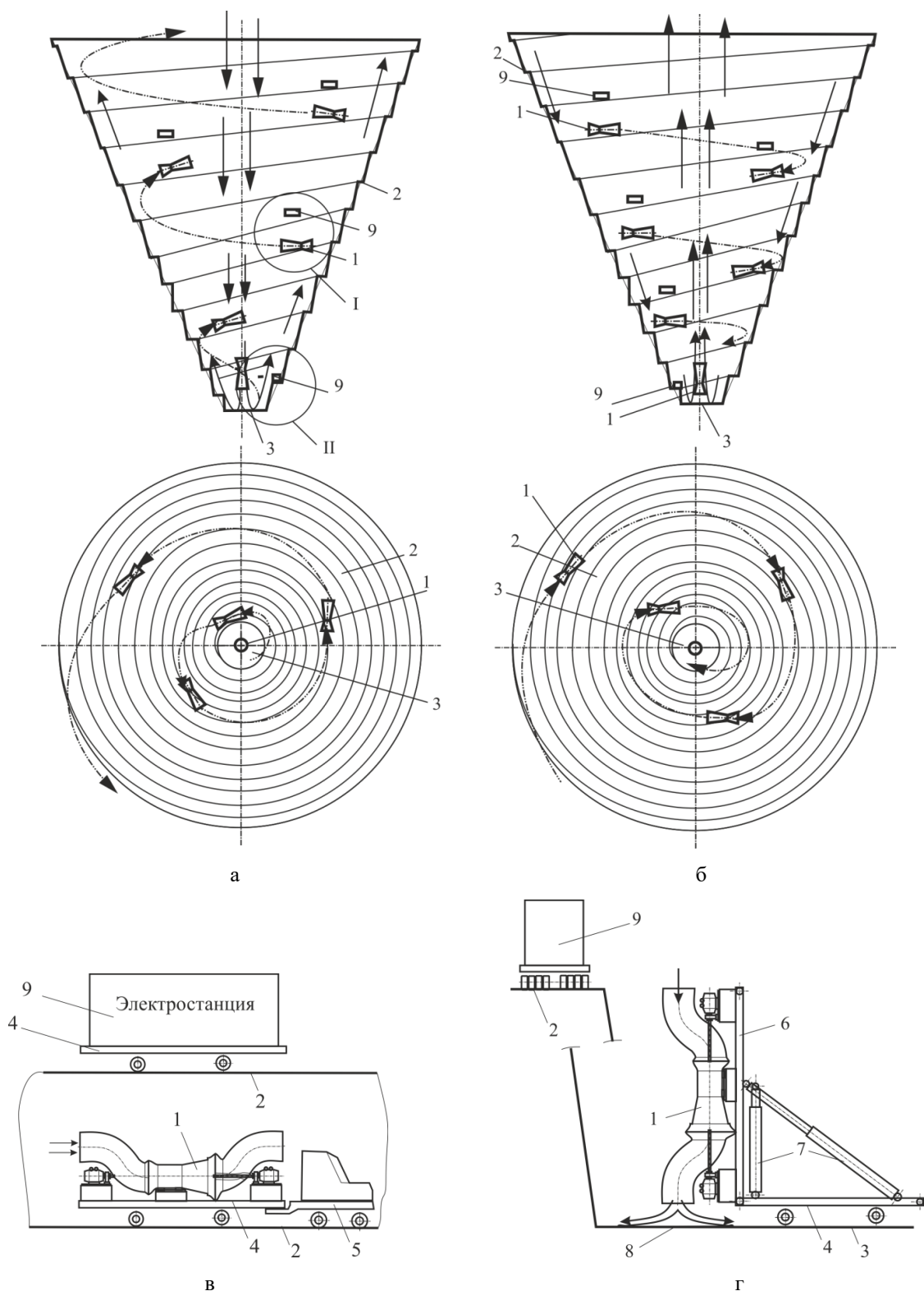


Рис. 5. Схема проветривания карьера: а – антициклон; б – циклон; в – узел I; г – узел II; 1 – вентиляционная установка; 2 – уступы; 3 – дно; 4 – прицеп; 5 – тягач; 6 – рама; 7 – подъемный механизм; 8 – постель; 9 – блок питания

Fig. 5. Open pit ventilation process flow chart: а is an anticyclone; б is a cyclone; в is unit I; г is unit II; 1 is a ventilation unit; 2 is benches; 3 is a bottom; 4 is a trailer; 5 is a traction engine; 6 is a frame; 7 is lifting mechanism; 8 is a bed; 9 is a power supply unit

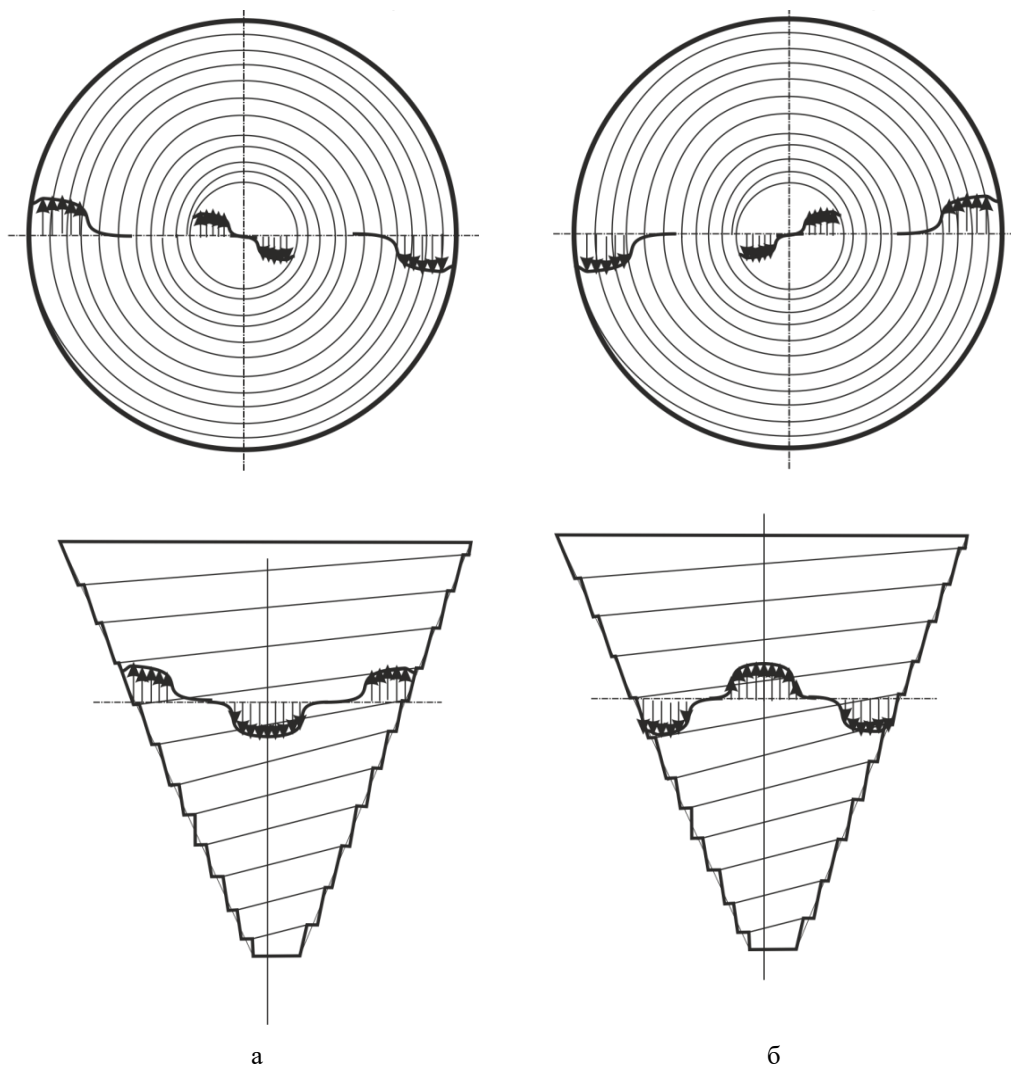


Рис. 6. Эпюры скоростей масс воздуха внутри карьера: а – при антициклоне; б – при циклоне
 Fig. 6. Air mass flow velocity curve inside the open pit: a is for the anticyclone; б is for the cyclone

То есть раскручивание только внешних слоев воздуха вдоль бортов карьера или центрального вертикального столба воздуха для приведения в движение массы воздуха внутри карьера недостаточно для его вентиляции и эффективного проветривания. При этом видно, что направление движения воздушных масс имеет существенное значение. Количество вентиляционных установок (по одному или по несколько в одной точке), частоту их установки на бортах и тип вентиляционных установок заранее предусмотреть нет возможности, так как на это влияет множество факторов даже внутри одного и того же карьера. Их количество и мощность варьируют на основании экспериментальных исследований. Однако составить предварительный прогноз можно используя методы компьютерного проектирования [18-20].

Заключение

Исследование эффективности способа производились с использованием системного моделирования ANSYS. Данный программный продукт позволяет учитывать взаимодействие между естественными воздушными потоками и локальными искусственными потоками, создаваемыми работой вентиляционных установок, а также микроклимат в атмосфере карьеров, а именно температуру воздуха, его влажность, ветровые потоки, сезонные климатические условия (рис. 7). Для моделирования аэродинамики карьера и построения полей воздушного потока были использованы значения, соответствующие характеристикам промышленных вентиляционных установок.

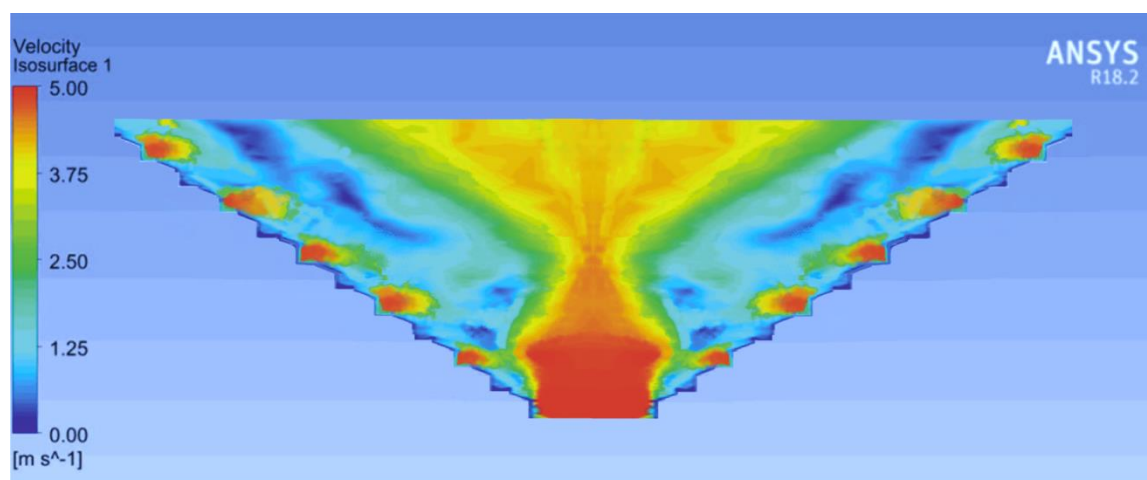


Рис. 7. Распределение скоростей воздушного потока в карьерном пространстве

Fig. 7. Distribution of air flow velocities in the open pit

Как показали расчеты, наиболее эффективными являются установки, такие как ВДН-21 и ДН-21, со следующими характеристиками: производительность 135 тыс. м³/ч, потребляемая мощность 400 кВт, полное давление (разрежение) 7200 Па, частота вращения двигателя 1000 об/мин, температурный интервал окружающего воздуха при эксплуатации -30...+40°C. Причем данные установки размещались на дне карьера, способствуя созданию циклона и антициклона. Характеристики установок, используемых для создания направленного воздушного потока вдоль бортов карьера, соответствовали параметрам установок местного проветривания и варьировались в широком диапазоне значений: начальный расход воздуха от 125 до 3770 м³/с, потребляемая мощность от 1000 до 1200 кВт, дальность струи до 1300 м, расход воздуха в конце активного участка струи до 80000 м²/с. Причем данные установки с турбореактивным двигателем монтируются на базе автомобиля и могут быть перемещены на наиболее востребованный участок.

Из рис. 7 можно сделать вывод, что использование разработанного способа проветривания [16] позволит даже при неблагоприятных метеорологических условиях ликвидировать образование застойных зон, создать атмосферу в карьере, соответствующую требованиям правил безопасности при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом, исключит вынужденные простои карьеров вследствие превышения ПДК, снизит экономический ущерб и улучшит экологический климат как внутри, так и вблизи карьера.

Список источников

1. Стась Г.В., Сарычев В.И., Пушкарев А.Е. Обеспечение безопасных условий труда при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом // Известия ТулГУ. Естественные науки. 2012. Вып. 1. Ч. 2. С. 188-198.
2. Технология и безопасность взрывных работ / Вохмин С.А., Курчин Г.С., Кирсанов А.К. и др. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2022. 216 с.
3. Шувалов Ю.В., Мохамад Асад, Бульбашев А.П. Атмосферные выбросы вредных веществ при открытой добыче полезных ископаемых // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2000. №11. С. 46-49.
4. Конорев М.М., Нестеренко Г.Ф. Вентиляция и пылегазоподавление в атмосфере карьеров. Екатеринбург, 2000. 312 с.
5. Sergey G. Shakhrai, Georgii S. Kurchin, Aleksandr G. Sorokin. New technical solutions for ventilation in deep quarries // Journal of Mining Institute. 2019. Vol. 240. P. 654-659.
6. Конорев М.М., Нестеренко Г.Ф. Обоснование выбора схем проветривания и режимов работы систем вентиляции карьеров // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2002. №4. С. 73-76.
7. Конорев М.М. К вопросу вентиляции и пылегазоподавления в атмосфере карьеров // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2006. №51. С. 107-126.
8. Shizhai Zhang. Experimental study on performance of contra-rotating axial flow fan // International Journal of Coal Science & Technology. September 2015. Vol. 2. Issue 3. P. 232-236.
9. Козырев С.А., Амосов П.В. Пути нормализации атмосферы глубоких карьеров // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2014. Т. 17. №2. С. 231-237.
10. Способы проветривания карьеров / Тимофеева Ю.В., Суксова С.А., Долкан А.А., Попов Е.В. // Вестник

- Евразийской науки. 2020. №6. Т. 12. <https://esj.today/issue-6-2020.html>.
11. Морин А.С. Роль методов искусственного проветривания в комплексе мероприятий по управлению пылегазовым режимом карьеров // Известия вузов. Горный журнал. 2007. №1. С. 24-28.
 12. Шахрай С.Г., Курчин Г.С., Сорокин А.Г. Экспериментальное исследование эффективности естественного проветривания карьера через трубопроводы // Известия вузов. Горный журнал. 2019. №1. С. 133.
 13. Пат. 2733542 Российская Федерация, МПК E21F1/00. Способ проветривания карьера / Ковлеков И.И.; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова». № 2020122853; заявл. 10.07.2020; опубл. 20.10.2020.
 14. А.с. SU1122831, МПК E21F1/00. Способ проветривания карьера / Бордий А.П., Верба Ю.В., Кижло Л.А.; заявитель «Днепропетровский филиал всесоюзного научно-исследовательского и проектно-конструкторского института горнорудного машиностроения». № 3489899/22-03; заявл. 07.09.1982; опубл. 07.11.1984.
 15. Пат. 2164602 Российская Федерация, МПК E21F1/00. Способ проветривания глубоких карьеров / Морин А.С., Буткин В.Д.; заявитель и патентообладатель «Красноярская государственная академия цветных металлов и золота». № 99110111; заявл. 12.05.1999; опубл. 27.03.2001.
 16. Пат. 2172839 Российская Федерация, МПК E21F1/00. Способ искусственной вентиляции глубоких карьеров / Морин А.С., Буткин В.Д.; заявитель и патентообладатель Красноярская государственная академия цветных металлов и золота. № 2000111294; заявл. 06.05.2000; опубл. 27.08.2001.
 17. Пат. 2765698 Российская Федерация, МПК E21F1/00. Способ проветривания карьеров / Сергеев В.В.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)». № 2021121149; заявл. 16.07.2021; опубл. 02.02.2022.
 18. Козырев С.А., Осинцева А.В., Амосов П.В. Управление вентиляционными потоками в горных выработках подземных рудников на основе математического моделирования аэродинамических процессов. Апатиты: Кольский научный центр Российской академии наук, 2019. 114 с.
 19. Амосов П.В., Козырев С.А., Назарчук О.В. Исследование влияния теплового фактора на аэродинамические параметры атмосферы карьера на основе трехмерного компьютерного моделирования // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. №S37. С. 322-332.
 20. Амосов П.В., Козырев С.А., Назарчук О.В. Разработка компьютерной модели аэротермодинамики атмосферы карьера в ANSYS FLUENT // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2018. №44(70). С. 121-125.
 21. Назарчук О.В., Амосов П.В., Козырев С.А. Моделирование аэродинамики атмосферы карьера в ANSYS FLUENT // Проблемы арктического региона: труды XVI Международной научной конференции студентов и аспирантов. Мурманск, 2017. С. 82-86.

References

1. Stas G.V., Sarychev V.I., Pushkarev A.E. Providing safety when mineral field development by open-cut method. *Izvestiya TulGU. Estestvennye nauki* [Bulletin of Tula State University. Natural Sciences], 2012, issue 1, part 2, pp. 188-198. (In Russ.)
2. Vokhmin S.A., Kurchin G.S., Kirsanov A.K. et al. *Tekhnologiya i bezopasnost vzryvnykh работ* [Technology and safety of blasting]. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2022, 216 p. (In Russ.)
3. Shuvalov Yu.V., Mohamad Asad, Bulbashev A.P. Atmospheric emissions of harmful substances during open pit mining. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin], 2000, no. 11, pp. 46-49. (In Russ.)
4. Konorev M.M., Nesterenko G.F. *Ventilyatsiya i pylgazopodavleniye v atmosfere karerov* [Ventilation and dust and gas suppression in atmosphere of quarries]. Yekaterinburg, 2000, 312 p. (In Russ.)
5. Shakhrai S.G., Kurchin G.S., Sorokin A.G. New technical solutions for ventilation in deep quarries. *Journal of Mining Institute*, 2019, 240, 654-659.
6. Konorev M.M., Nesterenko G.F. Rationale for choosing ventilation process flow charts and operation modes of open pit ventilation systems. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin], 2002, no. 4, pp. 73-76. (In Russ.)
7. Konorev M.M. Ventilation and dust and gas suppression in atmosphere of quarries. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin], 2006, no. S1, pp. 107-126. (In Russ.)
8. Shizhai Zhang. Experimental study on performance of contra-rotating axial flow fan. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2015, 2 (3), 232-236.
9. Kozыrev S.A., Amosov P.V. Ways of atmosphere normalization of deep open-pits. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Vestnik of Murmansk State Technical University], 2014, vol. 17, no. 2, pp. 231-237. (In Russ.)
10. Timofeeva Yu.V., Suksova S.A., Dolkan A.A., Popov E.V. Methods of airing quarries. *The Eurasian Scientific Journal*, 2020, no. 6, vol. 12. Available at: <https://esj.today/PDF/79NZVN620.pdf>.
11. Morin A.S. The role of forced ventilation methods in a set of measures to control dust and gas conditions in open pits. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal* [News of Higher Education Institutions. Mining Journal], 2007, no. 1, pp. 24-28. (In Russ.)

12. Shakhrai S.G., Kurchin G.S., Sorokin A.G. Experimental study on efficiency of open pit natural ventilation through pipelines. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal* [News of Higher Education Institutions. Mining Journal], 2019, no. 1, pp. 127-133. (In Russ.)
13. Kovlekov I.I. *Sposob provetrivaniya karera* [The method of ventilation of a quarry]. Patent RU, no. 2733542, 2020.
14. Bordiy A.P., Verba Yu.V., Kizhlo L.A. *Sposob provetrivaniya karera* [The method of ventilation of a quarry]. Author's certificate SU, no. 1122831, 1984.
15. Morin A.S., Butkin V.D. *Sposob provetrivaniya glubokikh karerov* [The method of ventilation of deep quarries]. Patent RU, no. 2164602, 2001.
16. Morin A.S., Butkin V.D. *Sposob iskusstvennoy ventilyatsii glubokikh karerov* [The method of forced ventilation of deep quarries]. Patent RU, no. 2172839, 2001.
17. Sergeev V.V. *Sposob provetrivaniya karerov* [The method of ventilation of quarries]. Patent RU, no. 2765698, 2022.
18. Kozyrev S.A., Osintseva A.V., Amosov P.V. *Upravlenie ventilyatsionnymi potokami v gornykh vyrabotkakh podzemnykh rudnikov na osnove matematicheskogo modelirovaniya aerodinamicheskikh protsessov* [Control of ventilation flows in underground mine workings applying a mathematical simulation of aerodynamic processes]. Apatity: Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences, 2019, 114 p. (In Russ.)
19. Amosov P.V., Kozyrev S.A., Nazarchuk O.V. Study on the influence of the thermal factor on the aerodynamic parameters of atmosphere of a quarry based on a three-dimensional computer simulation. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin], 2019, no. S37, pp. 322-332. (In Russ.)
20. Amosov P.V., Kozyrev S.A., Nazarchuk O.V. Development of a computer model of open pit atmosphere aerothermodynamics in ANSYS FLUENT. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta)* [Bulletin of Saint Petersburg State Technological Institute (Technical University)], 2018, no. 44(70), pp. 121-125. (In Russ.)
21. Nazarchuk O.V., Amosov P.V., Kozyrev S.A. Modeling of open pit atmosphere aerodynamics in ANSYS FLUENT. *Problemy Arkticheskogo regiona. Trudy XVI Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii studentov i aspirantov* [Problems of the Arctic region. Proceedings of the 16th International Scientific Conference of Students and Postgraduates]. Murmansk, 2017, pp. 82-86. (In Russ.)

Поступила 06.07.2022; принята к публикации 08.08.2022; опубликована 22.12.2022
Submitted 06/07/2022; revised 08/08/2022; published 22/12/2022

Сергеев Вячеслав Васильевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Горное дело», Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, Россия.

Герасименко Татьяна Евгеньевна – кандидат технических наук, начальник отдела интеллектуальной собственности, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, Россия. E-mail: gerasimenko_74@mail.ru. ORCID 0000-0001-7048-4379

Евдокимов Сергей Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Обогащение полезных ископаемых», Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, Россия. E-mail: eva-ser@mail.ru. ORCID 0000-0002-2960-4786

Герасименко Наталья Павловна – студентка, Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия. E-mail: nata.gerasimenko.2002@mail.ru.

Vyacheslav V. Sergeev – DrSc (Eng.), Professor of the Mining Department, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia.

Tatiana E. Gerasimenko – PhD (Eng.), Head of the Intellectual Property Department, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia. Email: gerasimenko_74@mail.ru. ORCID 0000-0001-7048-4379

Sergey I. Evdokimov – PhD (Eng.), Associate Professor of the Minerals Beneficiation Department, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia. Email: eva-ser@mail.ru. ORCID 0000-0002-2960-4786

Natalia P. Gerasimenko – student, Kuban State University, Krasnodar, Russia. Email: nata.gerasimenko.2002@mail.ru.

ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ И УТИЛИЗАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ И ОТХОДОВ

RECYCLING OF MAN-MADE MINERAL FORMATIONS AND WASTE

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

УДК 622.79

DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-4-26-36



СОСТОЯНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ УГОЛЬНЫХ ФЛОТАЦИОННЫХ КОНЦЕНТРАТОВ

Лавриненко А.А., Гольберг Г.Ю., Хамзина Т.А.

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

Аннотация. Настоящий обзор выполнен с целью выявления достоинств и недостатков применяемого фильтровального оборудования и поиска направлений интенсификации процесса обезвоживания угольных концентратов при увеличении в них доли тонких частиц для получения чистого фильтрата, пригодного для направления в линию оборотного водоснабжения фабрик. В работе рассмотрены процессы и оборудование ведущих российских и зарубежных производителей, применяемые в настоящее время на обогатительных фабриках для обезвоживания угольных флотационных концентратов. Отмечено, что наибольшее распространение получили дисковые вакуум-фильтры и гипербар-фильтры. Последние характеризуются высокой удельной производительностью и их применение целесообразно для обезвоживания сравнительно труднофильтруемых суспензий. В то же время камерные и ленточные фильтр-прессы применяются сравнительно редко. Осадительно-фильтрующие центрифуги эксплуатируют на некоторых обогатительных фабриках для обезвоживания смесей флотационного и мелкого гравитационного концентратов. Для рассмотренных процессов приведены значения влажности осадка, содержания твёрдой фазы в фильтрате, а для процессов обезвоживания фильтрованием – также удельной производительности по твёрдой фазе. Показаны достоинства и недостатки приведенного оборудования. Приведены методы интенсификации процессов флотационного обезвоживания. Показано, что применение флокулянтов на дисковых вакуум-фильтрах обеспечивает повышение скорости разделения суспензий и снижение содержания твердой фазы в фильтрате. Для исключения из технологического цикла термической сушки возможно применение гипербар-фильтров, оборудованных системой подачи перегретого водяного пара. Показано, что важным условием повышения эффективности обезвоживания флотационного концентрата является предварительное разрушение пены. Одним из перспективных способов представляется подача на пену под давлением раствора флокулянта в виде струй. Отмечено, что до настоящего времени в целом не решена проблема получения при обезвоживании флотационного концентрата чистого фильтрата, пригодного для направления в линию оборотного водоснабжения фабрик. Это обуславливает усложнение технологической схемы и снижение выхода товарной продукции.

Ключевые слова: угольный флотационный концентрат, обезвоживание, дисковые вакуум-фильтры, гипербар-фильтры, фильтр-прессы, осадительно-фильтрующие центрифуги, флокуляция, разрушение пены

© Лавриненко А.А., Гольберг Г.Ю., Хамзина Т.А., 2022

Для цитирования

Лавриненко А.А., Гольберг Г.Ю., Хамзина Т.А. Состояние процессов обезвоживания угольных флотационных концентратов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №4. С. 26-36. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-26-36>



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

COAL FROTH CONCENTRATE DEWATERING PROCESSES

Lavrinenko A.A., Golberg G.Yu., Khamzina T.A.

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

Abstract. This review is aimed at identifying advantages and disadvantages of applied filtering equipment and seeking ways to intensify coal concentrate dewatering, when increasing a share of fine particles to produce clean filtrate suitable for a recycling water supply line of plants. The paper describes processes and equipment of leading Russian and foreign manufacturers currently applied at beneficiation plants for coal concentrate dewatering. Vacuum and hyperbaric disc filters are noted to be mostly used, while the latter are characterized by high specific performance; therefore, it is feasible to use them for dewatering rather difficult-to-filter suspended matters. Chamber and belt filter presses are comparatively rare yet. Decanter centrifuges are operated at some coal preparation plants for dewatering mixtures of coal froth and fine gravity concentrates. The paper contains the values of cake moisture and solids content in the filtrate for the processes under consideration, and solid-phase specific output for dewatering by filtration. The authors describe advantages and disadvantages of the equipment and methods for intensifying dewatering. It is shown that the use of flocculants on vacuum disc filters provides for an increase in the rate of separation of suspended matters and a decrease in the solids content in the filtrate. To exclude thermal drying from the process cycle, hyperbaric filters may be used with a superheated steam supply system. An important condition for increasing efficiency of froth concentrate dewatering is a preliminary froth destruction. One of the promising methods is the jet supply of flocculants to the froth. It is noted that the problem of dewatering the froth concentrate to produce a clean filtrate suitable for supplying to the recycling water supply line of coal preparation plants has not been solved yet. This leads to increased complexity of the process flow chart and a decreased yield of marketable products.

Keywords: coal froth concentrate, dewatering, vacuum disc filters, hyperbaric filters, filter presses, decanter centrifuges, flocculation, froth destruction

For citation

Lavrinenko A.A., Golberg G.Yu., Khamzina T.A. Coal Froth Concentrate Dewatering Processes. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 4, pp. 26-36. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-26-36>

Введение

В настоящее время флотацией обогащают тонкие классы коксующихся углей на 28-ми обогатительных фабриках (ОФ) России. Значение этого процесса возрастает в связи с тенденцией к увеличению доли тонких частиц в добываемых углях [1]. Совершенствование процессов обогащения коксующихся углей осуществляется с целью повышения эффективности ресурсо- и энергосбережения, уменьшения выбросов вредных веществ в окружающую среду. Это, в свою очередь, обуславливает необходимость повышения эффективности процессов обезвоживания флотационного концентрата (ФК), прежде всего снижения влажности обезвоженного осадка и уноса твёрдой фазы в фильтрат, повышения скорости разделения суспензий.

Особенности процесса обезвоживания ФК на углеобогащательных фабриках (ОФ) заключаются в следующем [1-5]:

- суспензия продукта, поступающего на обезвоживание с флотационных машин, характеризуется сравнительно высоким содержанием твёрдой фазы, порядка 150-300 кг/м³, поэтому сгущение суспензии не требуется;
- после обезвоживания фильтрованием ФК на

некоторых ОФ направляют на термическую сушку, которая является самой затратной и экологически опасной операцией в технологической схеме обогащения углей, поэтому для уменьшения себестоимости концентрата и ущерба от загрязнения окружающей среды пылевыми и газовыми выбросами сушильных установок существенное значение имеет снижение влажности флотационного концентрата в процессе его обезвоживания.

Целью работы является оценка состояния процессов обезвоживания угольных флотационных концентратов, применяемого оборудования и выявления направлений совершенствования этих процессов.

Процессы и оборудование для обезвоживания ФК

Для обезвоживания ФК на отечественных и зарубежных ОФ с середины XX в. до настоящего времени широко применяют *дисковые вакуум-фильтры* (ДВФ). В числе ведущих производителей этого оборудования за рубежом являются:

- "Andritz AG" (Австрия), выпускает для угольной промышленности ДВФ под маркой "Stardisc" с площадью поверхности фильтрования от 60 до 247 м² [6];

– "FLSmidt" (Дания-США, включает бывшие "Dorr Oliver" и "Eimco"), площадь поверхности фильтрования фильтров марки "Edisc" – до 310 м^2 [7];

– ОАО БМЗ «Прогресс» (Украина), выпускает типоразмерный ряд фильтров ДОО с площадью поверхности фильтрования от 16 до 250 м^2 [8].

В России дисковые вакуум-фильтры для угольной и горнорудной промышленности выпускают следующие предприятия:

– УК «Рудгормаш» (г. Воронеж), выпускает фильтры ДОО с площадью поверхности фильтрования 63, 80 и 100 м^2 [9];

– ООО «Гидротренд» (г. Екатеринбург), выпускает фильтры типоразмерных рядов ДОО с площадью поверхности фильтрования от 16 до 250 м^2 и ДТО с площадью поверхности фильтрования 34, 51 и 68 м^2 [10].

Конструктивные различия между перечисленными фильтрами различных производителей несущественны.

Область применения ДВФ ограничена следующими требованиями к сырью:

– удельное объёмное сопротивление осадка α_0 не более $(2-3) \cdot 10^{13} \text{ м}^2$, это обусловлено тем, что при минимальном значении частоты вращения дисков толщина осадка h должна составлять не менее 7-8 мм, в противном случае эффективность съёма осадка отдувкой существенно снижается;

– скорость расслоения суспензии не более 18 мм/с;

– содержание частиц крупностью $+0,5 \text{ мм}$ не более 5%.

ДВФ эксплуатируют при значении вакуума $(5-8) \cdot 10^4 \text{ Па}$, избыточного давления в системе отдувки осадка $(0,5-1,5) \cdot 10^5 \text{ Па}$, частота вращения дисков $0,003-0,025 \text{ с}^{-1}$. На отечественных ОФ значения технологических показателей работы ДВФ при обезвоживании ФК без флокулянта (например, ГОФ «Томусинская», ОФ «Анжерская», ГОФ «Красногорская», ГОФ «Тайбинская»), как правило, находятся в следующих пределах [3, 11, 12]:

– удельная производительность по твёрдой фазе – $100-320 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{ч}$;

– влажность осадка – 25-31%;

– содержание твёрдой фазы в фильтрате весьма высокое – $35-50 \text{ кг/м}^3$, поэтому этот поток направляют не в линию оборотного водоснабжения ОФ, а на флотацию.

Достоинства ДВФ: непрерывный режим работы; сравнительная простота устройства и эксплуатации; возможности гибкого регулирования режима работы за счёт изменения частоты вра-

щения дисков; возможности подачи исходной суспензии на фильтр без применения насосов. Недостатки: относительно высокая влажность обезвоженного осадка; сравнительно высокое содержание твёрдой фазы в фильтрате.

Более высокая степень обезвоживания обеспечивается применением особой разновидности дисковых фильтров – *керамических фильтров* [13, 14]. Рабочая поверхность дисков изготовлена из специальной мелкопористой керамики. Обезвоживание суспензий происходит под действием капиллярных сил. Для регенерации рабочей поверхности фильтров после съёма осадка в каждом цикле предусмотрено удаление частиц твёрдой фазы из пор керамики ультразвуком и промывкой раствором азотной кислоты. Согласно [15], при обезвоживании угольных концентратов с содержанием твёрдой фазы 50-65% влажность осадка достигает 18-20% при удельной производительности $550-930 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{ч}$. Достоинства керамических фильтров заключаются в сравнительно высокой степени обезвоживания осадка и в меньших затратах энергии по сравнению с ДВФ. Недостатки: необходимость использования специальной, сравнительно дорогостоящей керамики и кислотоупорных конструкционных материалов; сложность эксплуатации. В России эти фильтры в настоящее время не применяют для обезвоживания угольных ФК. В то же время их применяют для обезвоживания рудных концентратов, например медного концентрата в ПАО «ГМК "Норильский никель"» [16].

Высокая эффективность обезвоживания ФК достигается применением *гипербар-фильтров* (ГБФ). Они представляют собой дисковый фильтр, помещённый в герметичный сосуд, работающий под избыточным давлением воздуха (**рис. 1**). Ведущий производитель ГБФ – "Andritz AG", площадь поверхности фильтрования – до 120 м^2 . Также ГБФ выпускает "Bokela GmbH" (Германия).

Первоначально ГБФ получили распространение на зарубежных предприятиях по обогащению углей с 80-х гг. XX в. [5, 18]. С начала XXI в. ГБФ были установлены на следующих ОФ России:

– на ЦОФ «Кузбасская» в 2004 г. были установлены ГБФ "Andritz" с площадью поверхности фильтрования 120 м^2 [19, 20];

– на ОФ «Междуреченская» с 2008 г. работают два ГБФ "Andritz" с площадью поверхности фильтрования 96 м^2 каждый [19];

– на ОФ «Матюшинская» с 2013 г. работают два ГБФ "Andritz" с площадью поверхности фильтрования 120 м^2 каждый [21].

Технологическая схема обезвоживания ФК на ГБФ предусматривает подачу исходной суспензии на фильтр обязательно насосом под давлением, отдельную подачу сжатого воздуха в корпус фильтра под давлением $(3-5) \cdot 10^5$ Па и в систему отдувки осадка под давлением $(7-8) \cdot 10^5$ Па.

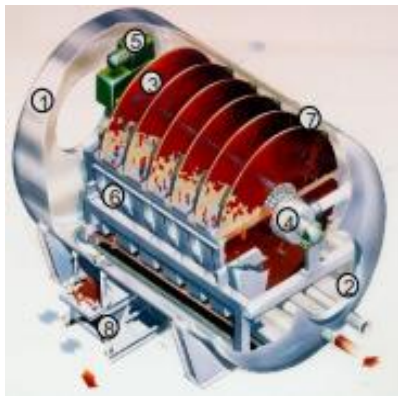


Рис. 1. Схема ГБФ фирмы "Andritz AG" [17]:
1 – сосуд под давлением; 2 – отверстие;
3 – диск, состоящий из секторов;
4 – распределительная головка; 5 – привод
ячейкового вала; 6 – ванна; 7 – мешалка
с наклонной осью вращения; 8 – устройство
для выгрузки осадка

Fig. 1. A hyperbaric disc filter by Andritz AG [17]: 1 is a pressure vessel; 2 is a manhole; 3 is a filter disc; 4 is a control head; 5 is a filter drive; 6 is a filter trough; 7 is a paddle agitator; 8 is a discharger

Согласно [3, 19, 21], технологические показатели работы ГБФ на ЦОФ «Кузбасская», ОФ «Междуреченская» и ОФ «Матюшинская» при обезвоживании суспензий угольных частиц с верхним пределом крупности 150 (200) мкм следующие: удельная производительность по твёрдой фазе соответственно 420, 750 и 500 кг/м²·ч, а влажность обезвоженного осадка для всех трёх ОФ примерно одинаковая – 19-22%. На некоторых зарубежных ОФ влажность достигает 16-18% [18].

По сравнению с ДВФ ГБФ обеспечивают более высокую удельную производительность по твёрдой фазе и более низкую влажность осадка, а также возможность эффективного обезвоживания сравнительно труднофильтруемых осадков (удельное объёмное сопротивление – до 10^{14} м⁻²). В то же время для ГБФ характерны более высокие по сравнению с ДВФ капитальные и эксплуатационные затраты.

Под избыточным давлением воздуха работают также *фильтр-прессы плиточно-рамные и камерные (КФП)*, которые обеспечивают возможность глубокого обезвоживания флотационного концентрата за счёт просушки осадка воздухом под давлением до $1,6 \cdot 10^6$ Па или отжимом при помощи диафрагм. Ряд зарубежных фирм выпускает КФП

специально для продуктов обогащения углей, в том числе и с возможностью просушки осадка. Например, фирма Jingjin Equipment Co., Ltd. (Китай) выпускает крупнометражные камерные фильтр-прессы для обезвоживания продуктов обогащения углей с размерами плит до 2×2 м и площадью поверхности фильтрования (*S*) до 1200 м² [22]. Характерной особенностью конструкции выпускаемых этой фирмой КФП является одновременное перемещение при выгрузке осадка не одной, а нескольких (5-7) фильтрующих плит, что сокращает время операции.

Также крупнометражные КФП для обезвоживания продуктов обогащения выпускают фирмы: "Andritz AG" с *S* до 2000 м² [23]; "FLSmidth" с *S* до 2040 м² [24]; "Metso Outotec" с *S* до 850 м² [25] и ряд других.

Технологическая схема обезвоживания суспензий на КФП включает: компрессор, сосуд под давлением для подачи исходной суспензии на фильтр, сборник фильтрата, конвейер для обезвоженного осадка. Влажность последнего и содержание твёрдой фазы в фильтрате на КФП и ГБФ сопоставимы. В то же время КФП, в отличие от ДВФ и ГБФ, характеризуются периодическим режимом работы, и это обуславливает весьма низкую удельную производительность КФП по твёрдой фазе (не выше 50 кг/м²·ч), то есть примерно в 10-20 раз ниже по сравнению с ГБФ. Также для КФП капитальные затраты в несколько раз выше по сравнению с ДВФ и ГБФ. Поэтому применение КФП, по нашему мнению, целесообразно только для обезвоживания труднофильтруемых тонкодисперсных ФК, если нагрузка по твёрдой фазе сравнительно невелика (не выше 30-40 т/ч) и требуется глубокое обезвоживание осадка.

В настоящее время на ОФ России КФП применяют только для обезвоживания необогащённых шламов и отходов флотации [26-28]. За рубежом КФП сравнительно редко применяют для обезвоживания тонкодисперсных угольных суспензий. Согласно [29], в США на предприятии "Eastern US Coal Plant" с 1998 г. концентрат коллонных флотационных машин крупностью -44 мкм обезвоживают на плиточно-рамных фильтр-прессах после предварительного разрушения пены, при этом влажность обезвоженного осадка составляет 22%. Также указано, что в Китае проводят исследования по применению автоматических фильтр-прессов, при этом влажность обезвоженного осадка составляет 16-18%, а производительность по твёрдой фазе 35-40 т/ч.

Процесс обезвоживания на *ленточных фильтр-прессах (ЛФП)* является конкурентоспособным по отношению к обезвоживанию на ДВФ при разделении сравнительно тонкодис-

персных суспензий и представляет интерес в качестве эффективного способа благодаря непрерывному режиму работы, простоте технологической схемы, невысоким капитальным и эксплуатационным затратам. На ОФ «Нерюнгринская» с 1999 г. осуществляют обезвоживание концентратов флотации углей с применением ЛФП [30, 31]. Технологическая схема предусматривает последовательное перемешивание суспензии концентрата с растворами анионоактивного и катионоактивного флокулянтов в статических смесителях и обезвоживание на ЛФП. Технологические показатели процесса при максимальной скорости движения лент, равной 0,35 м/с:

- содержание твёрдой фазы в исходной суспензии – 200-230 кг/м³;
- расход анионоактивного флокулянта – 101-152 г/т, катионоактивного – 76-113 г/т;
- влажность обезвоженного осадка – 30-33%;
- производительность фильтра по твёрдой фазе – 13-16 т/ч;
- содержание твёрдой фазы в фильтрате – до 25 кг/м³.

При этом на данной ОФ суммарные удельные затраты на обезвоживание ФК с применением ЛФП примерно в 1,2 раза ниже по сравнению с ДВФ.

В то же время для ЛФП характерны: более высокая влажность осадка по сравнению с КФП и ГБФ; высокий расход флокулянтов; низкая эффективность обезвоживания малосжимаемых осадков; возможность растекания суспензии по ленте в тех случаях, когда осадок к концу зоны дренирования не сформировался. Поэтому эта технология до настоящего времени не получила широкого распространения для обезвоживания ФК.

Обезвоживание с применением *центрифуг* является альтернативой фильтрационным методам. В настоящее время известно о применении осадительно-фильтрующих центрифуг (ОФЦ) для обезвоживания ФК совместно с мелким концентратом гравитационного обогащения крупностью от 0,2 до 1,0 (2,0) мм [11]. В числе ведущих производителей ОФЦ – "Andritz AG" [32], "FLSmidth" [33]. Устройство ОФЦ показано на **рис. 2**.

Согласно [35], ОФЦ эксплуатируют на ряде ОФ России. При этом на ЦОФ «Печорская», ОФ «Северная», ОФ «Антоновская» в питание центрифуг также добавляют ФК.

Значения технологических показателей работы ОФЦ для этих ОФ находятся в следующих пределах [11]:

- влажность обезвоженного осадка – 9-15%;
- унос твёрдой фазы в фугат – от 15 до 40%;
- производительность по твёрдой фазе – до 90 т/ч.

В отличие от фильтров, ОФЦ не требуют энергоёмкого вспомогательного оборудования и обеспечивают сравнительно низкую влажность обезвоженного осадка, что позволяет исключить термическую сушку. Главный недостаток: весьма значительный унос твёрдой фазы в фугат – до 40%. Это, в свою очередь, снижает выход товарного концентрата и создаёт проблемы с дальнейшим использованием фугата.

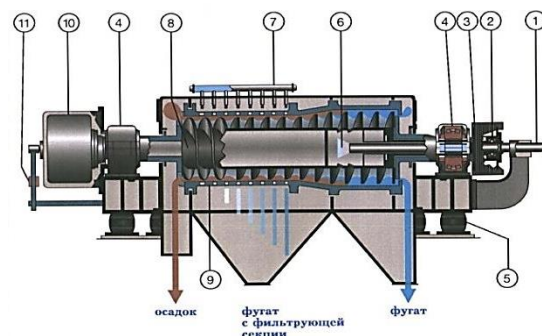


Рис. 2. Схема устройства осадительно-фильтрующей центрифуги [34]: 1 – питающая труба; 2 – упорные подшипники; 3 – ведомый шкив; 4 – главные подшипники; 5 – амортизаторы; 6 – питающая камера; 7 – система брызгал для промывки фильтрующей секции; 8 – шнек; 9 – фильтрующая секция; 10 – планетарный редуктор; 11 – датчик крутящего момента

Fig. 2. A decanter screen bowl centrifuge [34]: 1 is a feeding pipe; 2 are thrust bearings; 3 is a driven pulley; 4 are main bearings; 5 are shock absorbers; 6 is a feeding chamber; 7 is a sprinkler system for washing the screen section; 8 is a conveyor; 9 is a screen section; 10 is a planetary gearbox; 11 is a torque sensor

Методы повышения эффективности процессов обезвоживания ФК

Применение флокулянтов позволяет существенно повысить скорость разделения суспензий ФК, в особенности на ДВФ: удельная производительность по твёрдой фазе возрастает в 1,5-3 раза, содержание твёрдой фазы в фильтрате снижается в 2-3 раза. Флокулянты применяют на некоторых ОФ России, в том числе: ЦОФ «Сибирь», ЦОФ «Абашевская», ГОФ «Кузнецкая». Расход, как правило, составляет 5-30 г/т (в отдельных случаях до 100 г/т), удельная производительность по твёрдой фазе – в среднем 300 кг/м²·ч, влажность осадка – до 30%.

Из литературных данных известно, что зависимость значений влажности W и удельного сопротивления осадка α_0 от расхода флокулянта носит экстремальный характер [36, 37]. Такой характер зависимости для α_0 обусловлен, вероятно, насыщением адсорбционного слоя на поверхности частиц твёрдой фазы макромолекула-

ми флокулянта, а также увеличением вязкости фильтрата за счёт появления в нём избытка флокулянта. Значение W с увеличением расхода флокулянта сначала снижается за счёт увеличения диаметра пор, но дальнейший рост влажности обусловлен увеличением доли воды, иммобилизованной в пространстве между частицами. Поэтому для определения оптимальных значений расхода флокулянта в каждом конкретном случае целесообразно выполнение лабораторных экспериментальных исследований по обезвоживанию ФК фильтрованием под вакуумом для выбора наиболее эффективной марки флокулянта и его расхода q . По нашему мнению, оптимальное значение q находится в интервале между величинами, соответствующими минимальному значению α_0 и минимальной влажности осадка W .

Следует отметить, что на указанных ОФ применение флокулянтов не обеспечивает получение чистого фильтрата, пригодного для использования в линии оборотного водоснабжения, поэтому для извлечения угольных частиц фильтрат направляют на флотацию или на классификацию с последующей флотацией слива. Применение флокулянтов в процессе обезвоживания ФК на ГБФ нецелесообразно в связи с механической деструкцией флоккул под действием насоса подачи суспензии и мешалок в ванне фильтра.

При организации процесса обезвоживания ФК с применением флокулянтов необходимо контролировать скорость течения суспензии таким образом, чтобы свести к минимуму деструкцию флоккул.

Согласно [38], максимальная допустимая скорость течения суспензии по трубопроводам диаметром 0,2-0,6 м при расходе флокулянта 50 г/т составляет в среднем 1,8 м/с, а для расходов 100 и 200 г/т – соответственно 2,6 и 3,9 м/с. Рациональный режим течения суспензий ФК, обеспечивающий сохранность флоккул, согласно [38], целесообразно определять расчётным путём с учетом расхода флокулянта.

Просушка осадка перегретым водяным паром. В настоящее время известно, что этот способ применяют при обезвоживании ФК на ГБФ. Ранее попытки использования водяного пара для интенсификации других процессов обезвоживания показали низкую эффективность. По данным фирмы "Bokela GmbH" [39] ГБФ, оборудованные системой подачи перегретого пара, при обезвоживании ФК обеспечивают получение осадка с влажностью 8-11%, что исключает необходимость термической сушки. В то же время применение пара требует весьма значительных затрат энергии, сопоставимых с затратами на термическую сушку. Поэтому описанный способ не является универсальным, для его реализации в условиях конкрет-

ной ОФ требуется выполнение технико-экономического обоснования с учётом затрат на обезвоживание и термическую сушку ФК.

Ранее проводились исследования по просушке осадков ФК горячими дымовыми газами на патронных фильтрах под давлением, однако в связи с повышенной опасностью пожара и взрыва способ не получил развития.

Применение ПАВ осуществляют, как правило, при обезвоживании ФК фильтрованием под вакуумом [40, 41] с целью снижения влажности обезвоженного осадка на величину до 4% (абс.). В то же время есть основания полагать, что добавление этих реагентов может привести к стабилизации суспензии угольных частиц и, как следствие, к увеличению значения α_0 и, соответственно, снижению производительности фильтров.

Одним из важнейших условий эффективного обезвоживания ФК является *разрушение флотационной пены*. Характерное время этого процесса при его самопроизвольном протекании – несколько минут [42], но в условиях действующих предприятий, как правило, пена не успевает разрушиться к моменту поступления на операцию обезвоживания. Поэтому на практике реализуют следующие способы принудительного пеногашения [43]:

– Механические, заключающиеся в воздействии внешних сил. На практике реализуются в центробежных аппаратах, в которых жидкостная плёнка разрушается под действием сил инерции. В вакуумных аппаратах разрушение плёнки жидкости происходит за счёт увеличения разности давлений. Эффективность гашения пены при механическом способе составляет 30-40%, при вакуумном – 60%, при вакуумно-механическом – до 80% [43]. Также используется струйный способ [44], заключающийся в обработке пены струями воды, подаваемыми под давлением через распылительные устройства. По нашему мнению, перспективность этого способа заключается в возможности совмещения операции разрушения пены с флокуляционным кондиционированием, если вместо чистой воды подаётся раствор флокулянта.

– Химические [45, 46], заключающиеся в обработке пены реагентами, ускоряющими её разрушение.

– Комбинации механических и химических методов.

Из вышеизложенного следует, что существуют значительные и до настоящего времени полностью не реализованные возможности для повышения эффективности обезвоживания флотационного концентрата.

Сравнительные данные по технологическим показателям обезвоживания ФК на фильтровальном оборудовании приведены в **таблице**.

Таблица. Значения технологических показателей работы фильтровального оборудования при обезвоживании флотационного концентрата

Table. Performance of the filtering equipment for coal froth concentrate dewatering

Наименование оборудования	Значения технологических показателей		
	Удельная производительность по твёрдой фазе, кг/м ² ·ч	Влажность обезвоженного осадка, %	Содержание твёрдой фазы в фильтрате, кг/м ³
Дисковые вакуум-фильтры:			
– без флокулянта	100-320	25-31	35-50
– с флокулянтам	200-400	25-30	до 20
Гипербар-фильтры	400-800	16-22	до 10
Камерные фильтр-прессы	до 50	16-22	до 10
Ленточные фильтр-прессы	до 6*	30-33	до 25

* Удельная производительность на ширину ленты, кг/м·ч.

Заклучение

1. В настоящее время для операции обезвоживания угольных флотационных концентратов применяют главным образом:

– дисковые вакуум-фильтры, обеспечивающие удельную производительность по твёрдой фазе до 320 кг/м²·ч, влажность обезвоженного осадка 25-31%;

– гипербар-фильтры, для которых по сравнению с дисковыми вакуум-фильтрами удельная производительность по твёрдой фазе выше в 2,5-4 раза, влажность обезвоженного осадка меньше на 6-10% (абс.), содержание твёрдой фазы в фильтрате меньше в 3,5-10 раз. Фильтры целесообразны и перспективны для обезвоживания сравнительно труднофильтруемых суспензий, эффективное обезвоживание которых на дисковых вакуум-фильтрах невозможно;

– камерные фильтр-прессы, характеризующиеся весьма низкой удельной производительностью (до 50 кг/м²·ч), а также ленточные фильтр-прессы, требующие значительного расхода флокулянтов, применяются сравнительно редко;

– осадительно-фильтрующие центрифуги – для обезвоживания смесей флотационного и мелкого гравитационного концентратов.

2. Для интенсификации процесса обезвоживания флотационных концентратов на дисковых вакуум-фильтрах применяют флокулянты, которые обеспечивают повышение скорости разделения суспензий в 1,5-3 раза и снижение содержания твердой фазы в фильтрате в 2-3 раза. Перспективы совершенствования процесса обезвоживания флотационных концентратов с применением флокулянтов заключаются в оптимизации значений их расходов и скорости течения суспензий, обработанных флокулянтами.

3. Для исключения из технологического цикла термической сушки возможно применение гипербар-фильтров, оборудованных систе-

мой подачи перегретого водяного пара и обеспечивающих получение обезвоженного осадка с влажностью 8-11%.

4. Для повышения эффективности обезвоживания флотационного концентрата целесообразно предварительное разрушение пены. Одним из перспективных способов представляется подача на пену под давлением раствора флокулянта в виде струй.

5. Актуальной проблемой при обезвоживании флотационного концентрата является получение чистого фильтрата для направления в линию оборотного водоснабжения фабрик.

Список источников

1. Антипенко Л.А. Новые подходы к проектированию современных углеобогачительных фабрик // Уголь. 2020, № 7. С. 82-87.
2. Техника и технология обогащения углей. Справочное пособие / под ред. В.А. Чантурия, А.Р. Молявко. М.: Наука, 1995. 620 с.
3. Novak V. The analysis of process flowsheets and selection of equipment for coal fines dewatering // Proc. XVIII International Coal Preparation Congress, 28 June-01 July 2016 Saint-Petersburg, Russia. – Saint-Petersburg: Springer International Publishing AG, ed. by V. Litvinenko, 2016. P. 689-694.
4. Антипенко Л.А., Кравченко А.Е. Современное состояние и перспективы развития водно-шламовых систем углеобогачительных фабрик // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017, № 4. С. 156-165.
5. Bickert G. Solid-liquid separation technologies for coal: The Coal Handbook: Towards Cleaner Production: Volume 1: Coal Production. Ed. by Dave Osborne. Philadelphia: Woodhead Publishing, 2013. P. 422-445.
6. Separation. Maximum dewatering of fine coal particles. STARDISC vacuum disc filter [Электронный ресурс]: Сайт Andritz AG. URL: <https://www.andritz.com/resource/blob/269416/9b751599022b7dd4f41b0120f7bc196f/se-pas-stardisc-for-coal-en-data.pdf> (Дата обращения: 31.08.2022).

7. FLSmidth E-Disc [Электронный ресурс]: Сайт FLSmidth. Режим доступа: <https://www.flsmidth.com/-/media/brochures/brochures-products/filtration/flsmidth-e-disc-brochure.pdf> (Дата обращения: 31.08.2022).
8. Каталог оборудования «Прогресс» [Электронный ресурс]: Сайт Прогресс-Урал Инжиниринг. URL: http://progressural.com/files/Katalog_ProgressUralInzhiniring.pdf (Дата обращения: 31.08.2022).
9. Вакуум-фильтры типа ДОО [Электронный ресурс]: Сайт ОАО УК «Рудгормаш». URL: <https://www.rudgormash.ru/?mcat=1357> (Дата обращения: 31.08.2022).
10. Дисковые вакуум-фильтры [Электронный ресурс]: Сайт ООО «Гидротренд». URL: <https://hydrotrend.ru/vakuum-filters/disk-vakuum-filters/> (Дата обращения: 31.08.2022).
11. Антипенко Л.А. Технологические регламенты обогатительных фабрик Кузнецкого бассейна. Прокопьевск: Прокопьевское полиграфическое производственное объединение, 2007. 463 с.
12. Оценка предельной влажности угольного концентрата в промышленных обезвоживающих аппаратах / Шиляев М.И., Горбунков А.И., Богомолов А.Р., Хромова Е.М., Темникова Е.Ю. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2017, № 3. С. 163-174.
13. Фильтрование технологических пульп / Белоглазов И.Н., Голубев В.О., Тихонов О.Н., Кука Ю., Яскейнен Эд. М.: Руда и металлы, 2003. 320 с.
14. Ken Sutherland, George Chase. Filters and Filtration Handbook. 5th edition. Amsterdam: Elsevier, 2008. 522 P.
15. Ceramic Vacuum Disc Filter for Coal Mining [Электронный ресурс]: Сайт Zhengzhou Uniwin Filtering Equipment Co., Ltd. URL: <https://www.press-filter.com/product-detail/ceramic-vacuum-disc-filter/> (Дата обращения: 31.08.2022).
16. Разработка способа регенерации керамических элементов вакуум-фильтров на участке фильтрации медного концентрата сушильного цеха Медного завода / Ефимов А.А., Большакова О.В., Глибовец М.В., Мидюков Д.О. // Цветные металлы. 2022. № 2. С. 64-70. DOI: 10.17580/tsm.2022.02.08.
17. Raberger R., Dmitriewa T., Frohnwieser E., Krammer G. New control head design for hyperbaric disk filter gives better performance and longer life-time // Proc. XVIII International Coal Preparation Congress, 28 June-01 July 2016 Saint-Petersburg, Russia. Saint-Petersburg: Springer International Publishing AG, ed. by V. Litvinenko, 2016. P. 765-770.
18. Parekh B.K., Hogg R., Fonseca A. Evaluation of hyperbaric filtration for fine coal dewatering. Final report DOE Grant № DE-FG22-92PC92520. Pittsburg: U.S. Department of Energy Pittsburgh Energy Technology Center, 1996. 162 p.
19. Сазыкин Г.П. Новое поколение углеобогатительных фабрик Кузбасса // Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности: тр. междунар. науч.-практ. конф. Кемерово: ННЦ ГП – ИГД им. А.А. Скочинского, ИУУ СО РАН, КузГТУ, ЗАО КВК «Экспо-Сибирь», 2005. С. 63-68.
20. Милованова Е. Перемены к лучшему // Глобус. 2021. № 2 (66). С. 104-106.
21. Белокопытов П.И. Сушка горячей поверхностью – альтернатива термическим воздушным сушкам // Уголь. 2019. № 8. С. 108-109.
22. Фильтр-прессы горизонтальные [Электронный ресурс]: Сайт компании JINGJIN. URL: <https://jingjin.su/> (Дата обращения: 31.08.2022).
23. Andritz sidebar and overhead filter presses [Электронный ресурс]: Сайт Andritz AG. URL: <https://www.andritz.com/products-en/group/separation/filter-presses/filter-press-side-bar-overhead> (Дата обращения: 31.08.2022).
24. EIMCO® Colossal™ automatic filter press (AFP) [Электронный ресурс]: Сайт FLSmidth. URL: https://www.flsmidth.com/-/media/brochures/brochures-products/filtration/pressure-filters/colossalfilterpress_brochure_email.pdf (Дата обращения: 31.08.2022).
25. FPS filter [Электронный ресурс]: Сайт Metso Outotec. URL: <https://www.mogroup.com/portfolio/fp-s-filter-press/> (Дата обращения: 31.08.2022).
26. Дадаева Е. Концентрат качества и технологий // Глобус. 2019. № 3 (57). С. 36-42.
27. ООО «Эльгауголь». Эльгинский угольный комплекс. Сезонная обогатительная установка. Реконструкция в связи с переводом на круглогодичный режим работы. Проектная документация 46-2020/П-Д [Электронный ресурс] / ООО «Сибгеопроект». URL: <http://www.neruadmin.ru/upload/iblock/e5b/e5b521b4e2c567b3ef3a6b8a3b10da6d.pdf> (Дата обращения: 31.08.2022).
28. Установка камерных фильтр-прессов на обогатительных фабриках – это следование высочайшим экологическим стандартам [Электронный ресурс] / ТопПром Холдинг. URL: https://top-prom.ru/press-center/news/ustanovka_kamernyh_filtropressov_na_obogatitelynyh_fabrikah_eto sledovanie_vysochajshim_ekologicheskim_standartam_holding_topprom/ (Дата обращения: 31.08.2022).
29. Hand P.E. Dewatering and drying of fine coal to a saleable product: COALTECH 2020. 100 p.
30. Засядько А.В., Панфилов Ф.А., Гольберг Г.Ю. Опыт эксплуатации ленточных фильтр-прессов на операции обезвоживания концентратов и промпродуктов флотации коксующихся углей ОФ «Нерюн-гринская» // Кокс и химия. 2000. № 9. С. 9-11.
31. Zasyadko A.V., Kostromitin A.V., Osadchiy S.A., Lobanov F.I., Panfilov P.F., Golberg G.Yu. Dewatering of Flotation Concentrates and Middlings on Belt Press Filters // Proc. XV International Coal Preparation Congress and Exhibition. Beijing: China University of Mining and Technology Press. 2006. V. 2. P. 545-548.
32. Industrial processes redefined with ANDRITZ decanter centrifuges A [Электронный ресурс]: Сайт Andritz

AG. URL: <https://www.andritz.com/products-en/group/separation/decanter-centrifuges/decanter-centrifuges-a>. (Дата обращения: 31.08.2022).

33. Decanter Screenbowl Centrifuge [Электронный ресурс]: Сайт FLSmidth. URL: <https://www.flsmidth.com/en-gb/products/centrifugation-and-classification/decanter-screenbowl-centrifuge> (Дата обращения: 31.08.2022).
34. Mohanty M.K. Screen Bowl Centrifuge Dewatering Process: A Parametric Study // Physical Separation in Science and Engineering. 2007, Article ID 70376. 9 p.
35. Осадительно-фильтрующие центрифуги [Электронный ресурс]: Сайт Коралайна Инжиниринг. URL: http://coralina.ru/catalog/index.php?SECTION_ID=54&ELEMENT_ID=937. (Дата обращения: 31.08.2022).
36. Байченко А.А., Кардашов А.В. Действие композиций высокомолекулярных флокулянтов при обезвоживании флотационного угольного концентрата // Вестник КузГТУ. 2005. № 3. С. 66-69.
37. Yuping Fan, Xianshu Dong, Hui Li. Dewatering effect of fine coal slurry and filter cake structure based on particle characteristics // Vacuum. 2015. V. 114. P. 50-57.
38. Лавриненко А.А., Гольберг Г.Ю. Гидродинамический режим течения минеральных суспензий, обеспечивающий сохранность флокуляционных структур // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2019. № 3. С. 106-112.
39. Hahn J., Bott R., Langeloh T. HiBar Steam Pressure Filtration of Coal Ultrafines – New Developments and Results // Proc. XVIII International Coal Preparation Congress, 28 June-01, July 2016, Saint-Petersburg, Russia. Saint-Petersburg: Springer International Publishing AG, ed. by V. Litvinenko, 2016. P. 141-146.
40. Singh B.P. The influence of surface phenomena on the dewatering of fine clean coal // Filtration & Separation. 1997. V. 34, № 2. P. 159-163.
41. Nkolele A. Investigations into the reduction of moisture in fine coal by plant tests with surfactants // The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy. 2004, V. 104. P. 171-176.
42. Nguyen A.V. Flotation. In: Encyclopedia of Separation Science. Academic Press, 2000. P. 1-27.
43. Клейн М.С., Вахонина Т.Е. Технология обогащения углей: учебное пособие. Кемерово: КузГТУ, 2011. 128 с.
44. Тихомиров В.К. Пены. Теория и практика их получения и разрушения. 2-е изд., перераб. М.: Химия, 1983. 264 с.
45. Krasteva M., Tzotzorkov L., Nikolov D., Grigorova I., Nishkov I. Reagent – enhanced destruction of flotation froths // Proc. of 24th International Mineral Processing Congress, September, Beijing, China, 2008, pp. 2116-2122.
46. Yeşilyurt Z., Hassas B.V., Karakaş F., Boylu F. Ultrafine coal flotation and dewatering: Selecting the surfactants of proper hydrophilic-lipophilic balance (HLB) // International Journal of Coal Preparation and Utilization. 2020. V. 40, № 8. P. 564-580.

References

1. Antipenko L.A. New approaches to the design of modern coal processing plants. *Ugol* [Coal], 2020, no. 7, pp. 82-87. (In Russ.)
2. Chanturiya V.A., Molyavko A.R. *Tekhnika i tekhnologiya obogashcheniya ugley. Spravochnoe posobie* [Process and equipment for coal preparation]. Moscow: Nauka, 1995, 620 p. (In Russ.)
3. Novak V. The analysis of process flowsheets and selection of equipment for coal fines dewatering. Proceedings of the 18th International Coal Preparation Congress, 28 June - 01 July 2016, Saint-Petersburg, Russia. Saint-Petersburg: Springer International Publishing AG, ed. by V. Litvinenko, 2016, pp. 689-694.
4. Antipenko L.A., Kravchenko A.E. Water-slurry circuits at coal preparation plants: current state and development prospects. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2017, no. 4, pp. 156-165. (In Russ.)
5. Bickert G. Solid-liquid separation technologies for coal. The coal handbook: Towards cleaner production. Volume 1: Coal Production. Ed. by Dave Osborne. Philadelphia: Woodhead Publishing, 2013, pp. 422-445.
6. Separation. Maximum dewatering of fine coal particles. STARDISC vacuum disc filter by Andritz AG. Available at: <https://www.andritz.com/resource/blob/269416/9b751599022b7dd4f41b0120f7bc196f/s-e-pas-stardisc-for-coal-en-data.pdf> (Accessed on August 31, 2022).
7. FLSmidth E-Disc. Available at: <https://www.flsmidth.com/-/media/brochures/brochures-products/filtration/flsmidth-e-disc-brochure.pdf> (Accessed on August 31, 2022).
8. Progress-Ural Engineering equipment catalog. Available at: http://progressural.com/files/Katalog_ProgressUralInzhiniring.pdf (Accessed on August 31, 2022).
9. Vacuum filters of DOO type. Available at: <https://www.rudgormash.ru/?mcat=1357> (Accessed on August 31, 2022).
10. Vacuum disc filters. Available at: <https://hydrotrend.ru/vakuum-filters/disk-vakuum-filters/> (Accessed on August 31, 2022).
11. Antipenko L.A. *Tekhnologicheskie reglamenty obogatitelykh fabrik Kuznetskogo basseina* [Process regulations of beneficiation plants of the Kuznetsk Basin]. Prokopenvsk: Prokopenvsk Printing Production Association, 2007, 463 p. (In Russ.)
12. Shilyaev M.I., Gorbunkov A.I., Bogomolov A.R., Khromova E.M., Temnikova E.Yu. Limit moisture content of coal concentrate produced with industrial drainers. *Journal of Mining Science*, 2017, 53, 573-584.
13. Beloglazov I.N., Golubev V.O., Tikhonov O.N., Kuukka J., Jaaskelainen Ed. *Filtrovaniye tekhnologicheskikh pulp* [Filtration of technological pulps]. Moscow: Ore and metals, 2003, 320 p. (In Russ.)

14. Ken Sutherland, George Chase. Filters and filtration handbook. 5th edition. Amsterdam: Elsevier, 2008, 522 p.
15. Ceramic vacuum disc filter for coal mining. Available at: <https://www.press-filter.com/product-detail/ceramic-vacuum-disc-filter/> (Accessed on August 31, 2022).
16. Efimov A.A., Bolshakova O.V., Glibovets M.V., Midyukov D.O. Developing a method for regenerating ceramic elements of vacuum filters on the screen section of copper concentrate at the drying shop of the Copper Plant. *Tsvetnye metally* [Non-Ferrous Metals], 2022, no. 2, pp. 64-70. DOI: 10.17580/tsm.2022.02.08.
17. Raberger R., Dmitriewa T., Frohnwieser E., Krammer G. New control head design for hyperbaric disk filter gives better performance and longer life-time. Proceedings of the 18th International Coal Preparation Congress, 28 June - 01 July 2016, Saint-Petersburg, Russia. Saint-Petersburg: Springer International Publishing AG, ed. by V. Litvinenko, 2016, pp. 765-770.
18. Parekh B.K., Hogg R., Fonseca A. Evaluation of hyperbaric filtration for fine coal dewatering. Final report. DOE Grant No. DE-FG22-92PC92520. Pittsburgh: U.S. Department of Energy, Pittsburgh Energy Technology Center, 1996, 162 p.
19. Sazykin G.P. A new generation of coal preparation plants of the Kuznetsk Basin. *Energeticheskaya bezopasnost Rossii. Novye podkhody k razvitiyu ugolnoy promyshlennosti. Trudy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Energy security of Russia. New approaches to the development of the coal industry: Proceedings of the international scientific and practical conference]. Kemerovo: Skochinsky National Research Center of Mining – Mining Institute, Coal and Coal Chemistry Institute of the Siberian Branch, the Russian Academy of Sciences, Kuzbass State Technical University, CJSC Kuzbass Exhibition Company Expo-Siberia, 2005, pp. 63-68. (In Russ.)
20. Milovanova E. Changes for the better. *Globus* [Globe], 2021, no. 2 (66), pp. 104-106. (In Russ.)
21. Belokopytov P.I. Drying using a hot surface is an alternative to thermal air dryers. *Ugol* [Coal], 2019, no. 8, pp. 108-109. (In Russ.)
22. Horizontal filter presses. Available at: <https://jingjin.su/> (Accessed on August 31, 2022).
23. Andritz sidebar and overhead filter presses. Available at: <https://www.andritz.com/products-en/group/separation/filter-presses/filter-press-side-bar-overhead> (Accessed on August 31, 2022).
24. EIMCO® Colossal™ automatic filter press (AFP). Available at: https://www.flsmidth.com/-/media/brochures/brochures-products/filtration/pressure-filters/colossalfilterpress_brochure_email.pdf (Accessed on August 31, 2022).
25. FPS filter. Available at: <https://www.mogroup.com/portfolio/fp-s-filter-press/> (Accessed on August 31, 2022).
26. Dadaeva E. A concentrate of the quality and technologies. *Globus* [Globe], 2019, no. 3 (57), pp. 36-42. (In Russ.)
27. LLC ElgaCoal. Elga Coal Complex. Seasonal preparation plant. Revamping due to a transition to a continuous operation throughout the year. Design documentation 46-2020/P-D. Available at: <http://www.neruadmin.ru/upload/iblock/e5b/e5b521b4e2c567b3ef3a6b8a3b10da6d.pdf> (Accessed on August 31, 2022).
28. Installing chamber filter presses at preparation plants means following highest environmental standards. Available at: https://top-prom.ru/press-center/news/ustanovka_kamernyh_filtrpressov_na_obogatitelyh_fabrikah_eto_sledovanie_vysochajshim_ekologicheskimi_standartami_holding_topprom/ (Accessed on August 31, 2022).
29. Hand P.E. Dewatering and drying of fine coal to a saleable product. *COALTECH* 2020, 100 p.
30. Zasyadko A.V., Panfilov F.A., Golberg G.Yu. Experience in the operation of belt filter presses used for dewatering concentrates and industrial products of flotation of coking coals at the Neryunginskaya Coal Preparation Plant. *Koks i khimiya* [Coke and Chemistry], 2000, no. 9, pp. 9-11. (In Russ.)
31. Zasyadko A.V., Kostromitin A.V., Osadchii S.A., Lobanov F.I., Panfilov P.F., Golberg G.Yu. Dewatering of flotation concentrates and middlings on belt press filters. Proceedings of the 15th International Coal Preparation Congress and Exhibition. Beijing: China University of Mining and Technology Press, 2006, vol. 2, pp. 545-548.
32. Industrial processes redefined with ANDRITZ decanter centrifuges A. Available at: <https://www.andritz.com/products-en/group/separation/decanter-centrifuges/decanter-centrifuges-a>. (Accessed on August 31, 2022).
33. Decanter screenbowl centrifuge. Available at: <https://www.flsmidth.com/en-gb/products/centrifugation-and-classification/decanter-screenbowl-centrifuge> (Accessed on August 31, 2022).
34. Mohanty M.K. Screen bowl centrifuge dewatering process: A parameteric study. *Physical Separation in Science and Engineering*, 2007, Article ID 70376, 9 p.
35. Decanter screen bowl centrifuges. Available at: http://coralina.ru/catalog/index.php?SECTION_ID=54&ELEMENT_ID=937 (Accessed on August 31, 2022).
36. Baychenko A.A., Kardashov A.V. Effect of mixtures of high-molecular flocculants during dewatering of coal froth concentrates. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Vestnik of Kuzbass State Technical University], 2005, no. 3, pp. 66-69. (In Russ.)
37. Yuping Fan, Xianshu Dong, Hui Li. Dewatering effect of fine coal slurry and filter cake structure based on particle characteristics. *Vacuum*, 2015, 114, 50-57.
38. Lavrinenko A.A., Golberg G.Yu. Flow regime of mineral suspensions with preserved structure of flocs. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh* [Journal of Mining Science], 2019, no. 3, pp. 106-112. (In Russ.)
39. Hahn J., Bott R., Langeloh T. HiBar steam pressure fil-

- tration of coal ultrafines – New developments and results. Proceedings of the 18th International Coal Preparation Congress, 28 June – 01 July 2016, Saint-Petersburg, Russia. Saint-Petersburg: Springer International Publishing AG, ed. by V. Litvinenko, 2016, pp. 141-146.
40. Singh B.P. The influence of surface phenomena on the dewatering of fine clean coal. *Filtration & Separation*, 1997, 34 (2), 159-163.
 41. Nkolele A. Investigations into the reduction of moisture in fine coal by plant tests with surfactants. *The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 2004, 104, 171-176.
 42. Nguyen A.V. Flotation. In *Encyclopedia of Separation Science*, Academic Press, 2000, pp. 1-27.
 43. Klein M.S., Vakhonina T.E. *Tekhnologiya obogashcheniya uglej: uchebnoe posobie* [Coal preparation technology: study guide]. Kemerovo: Kuzbass State Technical University, 2011, 128 p. (In Russ.)
 44. Tikhomirov V.K. *Peny. Teoriya i praktika ikh polucheniya i razrusheniya* [Froth. Theory and practice of its production and destruction]. Moscow: Khimiya, 1983, 264 p. (In Russ.)
 45. Krasteva M., Tzotzorkov L., Nikolov D., Grigorova I., Nishkov I. Reagent – enhanced destruction of flotation froths. Proc. of the 24th International Mineral Processing Congress, September, Beijing, China, 2008, pp. 2116-2122.
 46. Yeşilyurt Z., Hassas B.V., Karakaş F., Boylu F. Ultrafine coal flotation and dewatering: Selecting the surfactants of proper hydrophilic–lipophilic balance (HLB). *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 2020, 40 (8), 564-580.

Поступила 01.09.2022; принята к публикации 30.09.2022; опубликована 22.12.2022
Submitted 01/09/2022; revised 30/09/2022; published 22.12.22

Лавриненко Анатолий Афанасьевич – доктор технических наук, заведующий лабораторией, Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия.
Email: lavrin_a@mail.ru.

Гольберг Григорий Юрьевич – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия.
Email: gr_yu_g@mail.ru.

Хамзина Татьяна Анатольевна – ведущий инженер, Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия.
Email: bagrowa@bk.ru. ORCID 0000-0002-1281-9801

Anatoly A. Lavrinenko – DrSc (Eng.), Head of the Laboratory, Academician Melnikov Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.
Email: lavrin_a@mail.ru.

Grigory Yu. Golberg – DrSc (Eng.), Lead Researcher, Academician Melnikov Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.
Email: gr_yu_g@mail.ru

Tatiana A. Khamzina – Lead Engineer, Academician Melnikov Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.
Email: bagrowa@bk.ru. ORCID 0000-0002-1281-9801

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 622.765.061.22:67.04:67.08
DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-4-37-46



ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ПРОЦЕССА ФЛОТАЦИИ ГРАФИТОВОЙ СПЕЛИ

Фадеева Н.В., Орехова Н.Н., Колодежная Е.В., Нигматова Н.Н.

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

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Графит – неполярный, неметаллический минерал, играющий важную роль во многих технологических процессах в разных областях промышленности. Альтернативным источником чешуйчатого графита является железографитовая спель металлургического производства (киш-графит). Для разделения графитосодержащего сырья с целью выделения чешуйчатого графита применяют флотацию. Основное направление совершенствования флотационного процесса – это интенсификация поверхностных свойств чешуек графита в процессе измельчения и корректировка режимов флотации с использованием более эффективных реагентов. **Объект исследования.** Железографитовая спель доменного цеха металлургического комбината. **Цель работы.** Изучение возможностей повышения показателей флотационного обогащения графитовой спели на основании установления физико-химических закономерностей флотации с использованием для измельчения центробежно-ударной мельницы и реагентов комплексного действия на основе действующего вещества диметилэтинилкарбинола. **Новизна.** Изучение закономерностей флотации с использованием предварительной механоактивации и новых, ранее не используемых для флотации графита реагентов, наиболее трудного для обогащения вида спели – доменного киш-графита. Изучено влияние способа и продолжительности дезинтеграции спели, содержания твердого в пульпе, вида реагента комплексного действия на показатели флотации. **Результат.** Сухой помол с механоактивацией в центробежно-ударной мельнице обеспечивает селективную дезинтеграцию и увеличение реакционной способности графитовых частиц, что обуславливает повышение массовой доли углерода в объединенном концентрате на 19,77% и уменьшение содержания магнитной фракции на 22,15%. Флотационные реагенты ДК-80 и МИКС проявляют различную флотационную активность по отношению к крупному и мелкому продуктам воздушной классификации. При флотации крупного продукта реагенты проявляют большую селективность к графиту, при флотации мелкого продукта селективность к графиту ниже, но по массовой доле магнитных частиц концентраты чище и извлечение углерода в них выше. Результаты будут использованы при разработке технологии флотации графитовой спели с использованием колонных флотомашин, характеризующихся повышением селективности флотации за счет процессов вторичного обогащения в пенном слое.

Ключевые слова: железографитовая спель, киш-графит, флотация, реагенты комплексного действия, диметилэтинилкарбинол, пенообразование, центробежно-ударное измельчение, динамическая классификация

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках выполнения гранта на проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований в 2022-2023 годах, соглашение номер 22-27-20068.

© Фадеева Н.В., Орехова Н.Н., Колодежная Е.В., Нигматова Н.Н., 2022

Для цитирования

Фадеева Н.В., Орехова Н.Н., Колодежная Е.В., Нигматова Н.Н. Исследование физико-химических закономерностей процесса флотации графитовой спели // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №4. С. 37-46. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-37-46>



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

STUDY ON THE PHYSICAL AND CHEMICAL REGULARITIES OF THE KISH GRAPHITE FLOTATION PROCESS

Fadeeva N.V., Orekhova N.N., Kolodezhnaya E.V., Nigmatova N.N.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). Graphite is a non-polar, non-metallic mineral that plays an important role in many technological processes in various industries. An alternative source of flake graphite is kish graphite from metallurgical production. Flotation is used to separate graphite-containing raw materials in order to isolate flake graphite. A main area of improving the flotation process is aimed at intensifying surface properties of graphite flakes in the separation process and adjusting flotation modes using more efficient reagents. **A subject of the study** is kish graphite from a blast furnace shop of an iron and steel works. **Objective** of the research is to study the possibilities of increasing the flotation concentration of kish graphite by determining physical and chemical regularities of the flotation using a centrifugal impact mill for grinding and complex reagents based on dimethyl ethynyl carbinol, an active substance. **Originality** lies in the study of the regularities of the flotation using preliminary mechanical activation and new reagents, previously not used for the flotation of graphite, the most difficult type of flake graphite for the concentration, namely blast furnace kish graphite. The authors have studied the influence of the method and duration of kish graphite disintegration, the content of solid particles in the slurry and the type of the complex reagent on the flotation parameters. **Result.** Dry grinding and mechanical activation in a centrifugal impact mill provides a selective disintegration and increases the reactivity of graphite particles. This leads to an increase in the mass fraction of carbon in the combined concentrate by 19.77% and a decrease in the content of the magnetic fraction by 22.15%. Flotation reagents DK-80 and MIKS show different flotation activity in respect of coarse and fine products of an air classification. During the flotation of coarse products, the reagents show a greater selectivity to graphite, while during the flotation of fine products, the selectivity to graphite is lower, but the concentrate is cleaner in terms of the mass fraction of magnetic particles and the carbon extraction is higher. The results obtained will be used to develop the kish graphite flotation technology in column flotation machines, which are characterized by increased flotation selectivity due to secondary concentration processes in the froth layer.

Keywords: iron kish, kish graphite, flotation, complex reagents, dimethyl ethynyl carbinol, foaming, centrifugal impact grinding, dynamic classification

The research was funded by the Russian Science Foundation as part of the grant for basic research and exploratory research in 2022-2023, Agreement No. 22-27-20068.

For citation

Fadeeva N.V., Orekhova N.N., Kolodezhnaya E.V., Nigmatova N.N. Study on the Physical and Chemical Regularities of the Kish Graphite Flotation Process. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 4, pp. 37-46. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-37-46>

Введение

Графит – неполярный, неметаллический минерал, играющий важную роль во многих технологических процессах в разных областях промышленности. Основным источником графита являются природные руды аморфного и чешуйчатого графита. Наиболее ценным и востребованным сырьем, особенно для высокотехнологичных областей использования, таких как производство композиционных материалов, литий-ионных аккумуляторных батарей и графена, является графит чешуйчатого строения. В России чешуйчатый графит относится к дефицитному сырью [1]. Альтернативным источником чешуйчатого графита является железографитовая спель металлур-

гического производства. Входящий в состав спели чешуйчатый графит (киш-графит) образуется в результате уменьшения растворимости графита в чугунах при его охлаждении на пути транспортировки до сталелитейных цехов. Географически этот источник будет определяться расположением металлургических центров черной металлургии [2]. Являясь побочным продуктом металлургического производства, ресурс имеет низкую стоимость, но с целью получения из него графита в настоящее время не эксплуатируется, несмотря на активизацию научных работ по данному направлению [3].

Анализ имеющихся публикаций и экспертный опрос показывает, что в технологической цепочке металлургического производства могут быть вы-

делены следующие участки образования железно-графитовой пыли: доменный, кислородно-конвертерный, сталеплавильный цеха. Разные температуры, достигаемые чугуном в соответствующих участках, и особенности ведения технологического процесса будут обуславливать отличия в объеме и качестве образующейся пыли. Анализ имеющихся публикаций и собственные работы [4] показывают, что железнографитовая спель доменного производства в полтора-два раза беднее по содержанию углерода/графита по сравнению со спелью сталеплавильного передела. Этим фактом, а также трудностью переработки спели доменного цеха обусловлен выбор железнографитовой спели сталеплавильных цехов в качестве объекта исследований в большинстве имеющихся публикаций.

Несмотря на высокие характеристики кристаллического строения киш-графита, условия образования техногенного сырья обуславливают у него наличие особенностей вещественного состава и технологических свойств, отражающихся на его поведении в схемах передела с использованием традиционных технологических процессов, применяемых для графитовых руд.

И в наших исследованиях [4], и в исследованиях китайских ученых [2] показано, что спелый графит, выделяющийся в пределах доменного цеха, является магнитным из-за ассоциации чешуек с железосодержащими микроразмерными частицами сферической формы. Этот факт не позволяет использовать для целей первичного

разделения спели магнитную сепарацию, как, например, предложено в работе [5]. Для очистки поверхности чешуек от металлических включений в работах [2, 5] предложено использовать обработку ультразвуком, а для получения графитового концентрата наиболее высокого качества – выщелачивание кислотой. Однако реализация таких энерго- и материалозатратных процессов будет экономически целесообразна применительно к предварительно селективно и наиболее полно сконцентрированным в промежуточном продукте графитовым чешуйкам. Наиболее распространенным подходом для разделения графитсодержащего сырья природного и техногенного происхождения с целью выделения чешуйчатого графита является пенная флотация, основанная на явном различии в смачиваемости поверхностей неполярного графита и полярных примесей.

Теория вопроса

Как показывает анализ опубликованных данных, предлагаемые для флотации киш-графита технологии и реагентные режимы соответствуют режимам переработки легкообогащаемых природных руд, богатых по содержанию углерода и с частицами графита значительных размеров. Используется измельчение продукта до определенной крупности и флотация с использованием аполярного собирателя, пенообразователя и в некоторых случаях модификатора поверхности (табл. 1).

Таблица 1. Условия флотации киш-графита

Table 1. Kish graphite flotation conditions

Сырье	Массовая доля углерода, %	Крупность	Содержание твердого в пульпе	Реагенты		Расход, г/т	Массовая доля углерода в концентрате, %
				Назначение*	Наименование		
Киш-графит сталеплавильного передела	40	-80 меш [2]	180 г/л	к	Керосин	20000	75,0
				п	2-октанол	2000	
Киш-графит сталеплавильного передела	45,1	-50+100 меш [5]	Нет данных	к	Мазут	Нет данных	59,6
				п	Метилизобутилкарбинол	Нет данных	
Отходы киш Pakistan Steels, Karachi	65	Нет данных [6]	15%	к	Керосин	50	80,53
				п	Сосновое масло	5	
				д	Силикат натрия	20	
				д	Крахмал	1500	
Киш-графит отделения десульфурации	55, 32,4 и 29,5	-355+180 меш [7]	200 г/л	к	Дизельное масло	По процессу	78,0 80
				п	T-frother	По процессу	

*к – коллектор, п – пенообразователь, д – модификатор депрессор.

Показатели флотации техногенного сырья оказываются ниже результатов обогащения природного графита и зависят от типа используемых реагентов и их сочетаний с собирателем. Так, в [5] показано, что реагент метилизобутилкарбинол (МIBC) является более селективным пенообразователем, чем традиционное сосновое масло и эффективность его действия увеличивается при добавлении керосина. Однако качество полученных концентратов оказывалось ниже, чем при использовании только МIBC за счет механического выноса загрязняющих веществ с пенным продуктом. В работе [7] отмечается, что киш-графит обладает высокой флотационной активностью и может флотироваться и без реагентов с получением концентрата с содержанием углерода около 45%. В этой же работе флотации подвергали узкие классы крупности с различными расходами пенообразователей и дизельного топлива. Показано, что крупные фракции флотируются с получением более высоких показателей, чем мелкие, а увеличение расходов реагентов приводит к загрязнению концентратов за счет уноса примесей в пену. Таким образом, совершенствование процесса флотации графита из железографитовой спели металлургического производства является актуальной задачей.

Основное направление совершенствования флотационного процесса корректировкой режимов флотации с использованием более эффективных реагентов для флотации киш-графита также актуально, как и для природного. Значительное количество работ, посвященных вопросам флотационного обогащения различных типов графитовых руд и поиску эффективных реагентов для флотации графита, выполнено на кафедре обогащения полезных ископаемых МГТУ им. Г.И. Носова под руководством В.Б. Чижевского. Изучение физико-химических свойств поверхности природного чешуйчатого графита выявило на его поверхности кислородсодержащие функциональные группы кислотного или основного характера: карбонильные, фенольные,

гидроксильные и лактонные. Для увеличения флотируемости такого окисленного графита предложено модифицирование его поверхности содой. Установлен различный характер взаимодействия графита с различными углеводородами и кислородсодержащими органическими соединениями, входящими в состав флотационных реагентов. Показано, что важнейшими параметрами, определяющими адсорбцию углеводородов различных классов на поверхности природного чешуйчатого графита, являются число атомов углерода в радикалах, их состав и строение (наличие двойной и тройной связей), валентное состояние атомов углерода, наличие и свойства функциональных групп [8]. На основании установленных закономерностей были рекомендованы флотационные реагенты из продуктов нефтепереработки и нефтехимических производств. Например, реагент ВКП (высококипящий продукт, являющийся кубовым остатком ректификации продуктов синтеза 2-этилгексанола из масляного альдегида), обладающий собирательными и пенообразующими свойствами, использование которого при флотации графитовых руд Тайгинского и Ботокольского месторождений позволило повысить извлечение углерода в концентратах на 2,5 и 0,71% соответственно.

Исходя из параметров, определяющих адсорбцию углеводородов на поверхности графита, представляют интерес реагенты комплексного действия ДК-80 и МИКС, имеющие в своем составе ацетиленовую связь. Реагенты имеют структурные формулы, представленные на рис. 1. Данные реагенты зарекомендовали себя как эффективные реагенты-собиратели со свойствами пенообразователей при флотации тонкоизмельченных руд цветных и благородных металлов и при флотации угля [9]. Применение диметилэтинилкарбинола позволило проводить флотацию угольной мелочи при повышенной плотности с получением показателей, не уступающих показателям базового режима углеобогатительной фабрики.

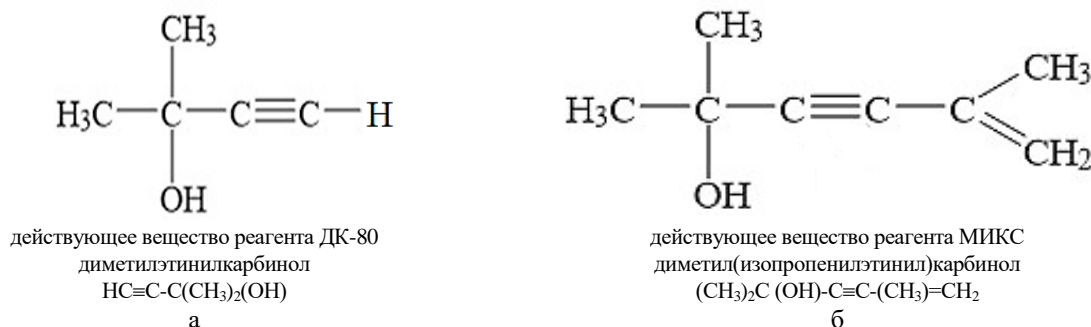


Рис. 1. Структурные схемы молекул веществ реагентов ДК-80 (а) и МИКС (б)

Fig. 1. Structural diagrams of molecules of substances in reagents DK-80 (a) and MIKS (b)

Важное влияние на эффективность обогащения графита флотацией будут оказывать подготовительные процессы, обуславливающие раскрытие сростков и физико-химическое состояние поверхности частиц. С продолжительностью измельчения связано уменьшение диаметра кристаллитов и увеличение относительного количества краевых атомов углерода, с которыми связано изменение смачиваемости мелких частиц графита [10]. А в работе [11] установлено, что метод измельчения может влиять на шероховатость поверхности частиц графита и тем самым на адсорбционную способность керосина и изменение смачиваемости частиц. В работах по измельчению графитов также отмечается, что при использовании разных способов помола возможно получение материалов одинаковой дисперсности, но разных свойств и наибольшие трудности вызывает агрегация частиц графита при размоле, что, в свою очередь, будет затруднять селективное разделение минералов [12].

Наличие мелкоразмерных загрязняющих примесей на поверхности киш-графита и существенные различия в физико-механических свойствах (твердости и хрупкости) минеральных составляющих графитовой спели обуславливают необходимость использования измельчительного оборудования, обеспечивающего селективное раскрытие зерен. В работе [13] показано, что в аппаратах центробежно-ударного дробления эффективное раскрытие зерен происходит за счет свободного удара частиц о футеровочную поверхность и друг об друга. При этом следует учитывать возможность изменения энергетического состояния поверхности частиц в таких мельницах, что обусловлено их более высокой энергонапряженностью по сравнению с шаровыми.

Таким образом, целью данной работы является изучение возможностей повышения показателей флотационного обогащения доменной графитовой спели на основании изучения физико-химических закономерностей флотации с использованием для измельчения центробежно-ударной мельницы и реагентов комплексного действия на основе действующего вещества диметилэтинилкарбинола.

Материалы и методы исследования

Исследования закономерностей флотационного обогащения железографитовой спели металлургического производства проводилось на пробе, отобранной в доменном цехе. Проба представляет собой дисперсный материал черного цвета с максимальной крупностью частиц 4 мм и незначительным количеством застывших брызг металла. Невооруженным глазом в пробе опреде-

ляется крупночешуйчатое состояние графита. Минералогический анализ пробы выполнен рентгенографическим количественным фазовым анализом (ПКФА) на дифрактометре SHIMADZU XRD-6000, Cu-анод, графитовый монохроматор. Содержания фаз рассчитаны в программном продукте SIROQUANT V4. Массовая доля углерода определялась с использованием анализатора серы и углерода CS-144DR путем сжигания пробы в атмосфере кислорода до CO₂. С использованием ручного магнита (H= 42,8 кА/м) определяли содержание магнитных частиц.

Подготовка пробы к флотации осуществлялась на лабораторной мельнице периодического действия со стальными шарами и центробежно-ударной мельницей, входящей в состав измельчительного комплекса КИ-0,36 для тонкого и сверхтонкого сухого измельчения различных по крепости, твердости и абразивности рудных и нерудных материалов, совмещенного с воздушной динамической классификацией (ЗАО «УралОмега», г. Магнитогорск, <https://uralomega.ru>). Измельчение в лабораторной мельнице проводилось при времени измельчения 5, 10, 20 мин, соотношении Т:Ж:Ш, равном 1:0,5:6. Измельчительный комплекс был настроен на получение продукта крупностью -0,074 мм. Флотация выполнялась на флотомашине ФМЛ с объемом камеры 1 дм³. Плотность пульпы составляла 5, 7,5, 10 и 20%. Флотация осуществлялась в открытом цикле с последовательной подачей и агитацией с реагентами. При использовании шарового измельчения керосин подавался в мельницу, при сухом измельчении все реагенты подавались в камеру флотомашин. Время агитации составляло 2 мин.

Используемые реагенты: собиратель – осветительный керосин и пенообразователь – ВКП, традиционные реагенты при обогащении графитовой руды Тайгинского месторождения; исследуемые реагенты комплексного действия, проявляющие и собирательную, и пенообразующую способность – индивидуальное соединение ДК-80 (действующее вещество диметилэтинилкарбинол) и реагент МиксДК (смесь реагентов ДМИПЭК+ДК-100 с соотношением 1:1) (действующее вещество диметил (изопропенилэтинил)карбинол), оба реагента производства ООО «БиоХимПром» (г. Москва) [14] получают прямым взаимодействием ацетилена с ацетоном с последующей дегидратацией продукта реакции на стадии его очистки ректификацией. Основное вещество имеет сопряженную систему π-электронов, состоящую из сочетания ацетиленовой и этиленовой связей.

Полученные результаты и их обсуждение

Полуколичественный рентгенофазовый анализ показал, что проба представлена преимущественно магнетитом и гематитом (около 50 и 25% соответственно), графита в пробе содержится 16%, оставшаяся часть пробы приходится на кварц. Массовая доля углерода составила 5,11%. Основные формы выделений графита в пробе – плоские блестящие чешуйки округлой или близкой к гексагональной формы, имеющие на своей поверхности значительное количество от мельчайших до достаточно крупных сферических включений (рис. 2). Сферическую форму имеют частицы, состоящие из железа и кислорода, размер выделений – от микроскопических до крупных. Загрязнение чешуек графита железосодержащими примесями подтверждается данными магнитного анализа по классам крупности (рис. 3).

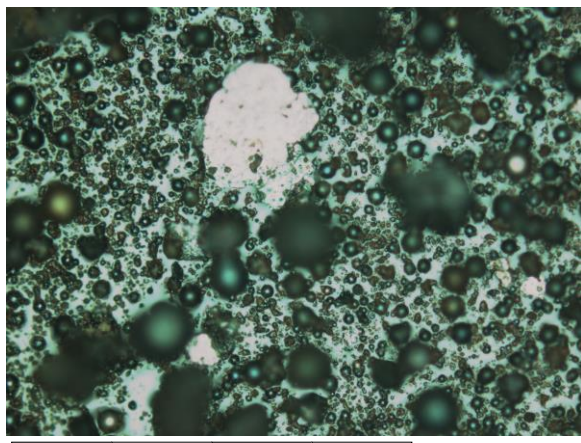


Рис. 2. Вид пробы под микроскопом (в 1-м делении – 100 мкм), выполнено на установке минерал C7 SIAMS Photolab в отраженном свете

Fig. 2. Microscope view of the sample (1 division is 100 μm) in Mineral C7 of SIAMS Photolab in reflected light

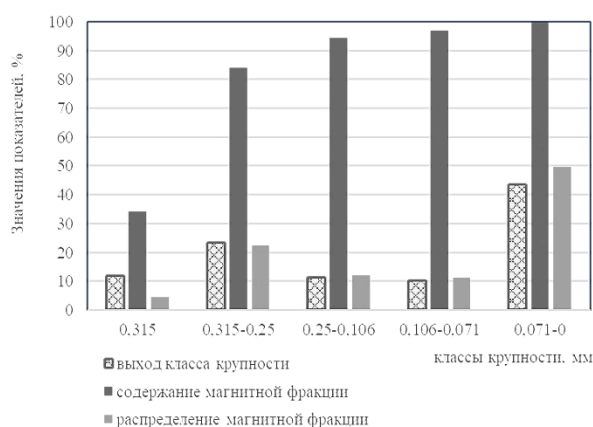
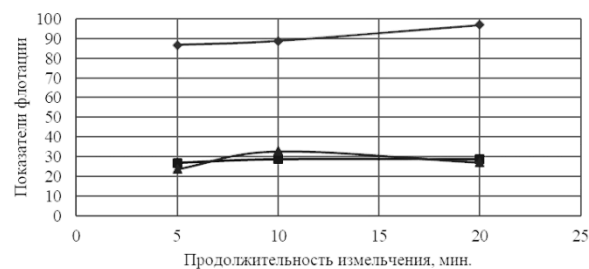


Рис. 3. Распределение магнитных частиц по классам крупности

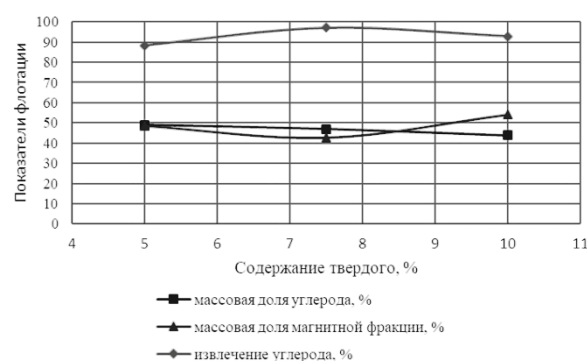
Fig. 3. Distribution of magnetic particles by size classes

Исследование влияния продолжительности измельчения в шаровой мельнице (рис. 4, а) показало, что при содержании твердого во флотации 20 % и повышении тонины помола с 63,5 до 81% класса – 0,074 мм выход концентрата находится в пределах 15,9-17,3%, существенного влияния на массовую долю углерода нет. Извлечение углерода в концентрат увеличивается на 10,5%. При этом наблюдается повышение содержания в пенном продукте магнитных частиц. Больше всего магнитной фракции извлекается в пенный продукт при крупности измельчения 70,88% класса – 0,074 мм.

При использовании более разбавленных пульп, содержащих 70,88% класса -0,074 мм, показатели флотации по углероду становятся выше – до 50% при содержании твердого 5% (рис. 4, б). Однако при этом увеличивается и содержание магнитных частиц. Наилучшие показатели флотации получены при содержании твердого 7,5%: выход концентрата составил 20,7%, массовая доля углерода – 47%, магнитной фракции – 42,8% при извлечении углерода в концентрат – 97%.



а



б

Рис. 4. Зависимость показателей флотации графитовой спели от продолжительности измельчения в шаровой мельнице (а) и содержания твердого во флотации (б)

Fig. 4. Dependence of the kish graphite flotation performance on the duration of grinding in a ball mill (а) and the solids content in the flotation (б)

В результате сухого измельчения графитовой спели в центробежно-ударной мельнице измельчительного комплекса КИ-0,36 с последующей динамической классификацией по классу -0,074 мм получены крупный и мелкий продукты, выход которых от исходной пробы составил соответственно 27 и 73%, при обогащении графитом мелкого продукта. Последующая флотация полученных продуктов позволяет получить более качественные графитовые концентраты, особенно из мелкого продукта классификации (табл. 2).

Перераспределение частиц графитовой пыли, измельченной в КИ-0,36, по продуктам динамической классификации происходит не только по крупности, но и по плотности, что обуславливает увеличение доли углерода в мелком продукте по сравнению с крупным. Уменьшение доли магнитной фракции в пенном продукте связано с очищением поверхности чешуек графита от сферических частиц оксидов железа и обусловлено более селективной дезинтеграцией ускоренных частиц, разрушающихся свободным ударом. Увеличение же массовой доли графита может быть связано с получением графитовых частиц более узкого гранулометрического состава. При этом соотношение площадей поверхностей чешуек, по которым графит гидрофобный, и пло-

щадей граней, по которым он гидрофильный, для большинства частиц будет одинаковым. Соответственно, это будет обуславливать одинаковое взаимодействие реагентов с минералом и одинаковую флотируемость всех частиц графита. Возрастание флотационной способности графита из железографитовой спели в результате механической активации его в мельнице центробежно-ударного типа выше в мелком продукте. Более активная флотация графита после измельчения его в центробежно-ударной мельнице наблюдалась и визуальна и проявлялась в образовании минерализованной пены уже в процессе перемешивания пульпы до подачи керосина. В связи с этим реагентный режим флотации был изменен и исключал подачу пенообразователя ВКП. То есть сухое измельчение в центробежной мельнице, характеризующейся более высокой энергонапряженностью [15], обуславливает также изменение физико-химического состояния поверхности частиц графита и повышение их флотационной способности.

Результаты исследования влияния реагентов комплексного действия на флотацию продуктов центробежно-ударного измельчения и динамической классификации железографитовой пыли приведены в табл. 3.

Таблица 2. Влияние механоактивации на показатели флотации графитовой спели

Table 2. Influence of mechanical activation on the kish graphite flotation performance

Способ помола	Выход концентрата, %	Массовая доля, %			Извлечение углерода, %
		углерода в измельченной пробе	углерода в концентрате	магнитной фракции	
Металлическими шарами ($\beta^{-0,074 \text{ мм}} = 81,16\%$)	17,27	5,11	28,7	27,1	97,02
Крупный продукт КИ-0,36 ($\beta^{-0,04 \text{ мм}} = 89,35\%$) *	7,84	4,09	46,2	5,27	88,61
Мелкий продукт КИ-0,36 ($\beta^{-0,04 \text{ мм}} = 91,3\%$) *	12,43	7,19	51,4	4,71	88,89

* Показатели флотации крупного и мелкого продукта рассчитаны от операции флотации.

Таблица 3. Влияние реагентов с ацетиленовой связью на показатели флотации продуктов классификации графитовой спели, измельченной в центробежной мельнице

Table 3. Influence of reagents with an acetylene bond on the flotation performance of the products of the classification of kish graphite crushed in a centrifugal mill

Реагент	Крупный продукт КИ-0,36				Мелкий продукт КИ-0,36			
	Выход, %	Массовая доля, %		Извлечение углерода, %	Выход, %	Массовая доля, %		Извлечение углерода, %
		углерода	магнитной фракции			углерода	магнитной фракции	
Керосин	7,84	46,2	5,27	88,61	12,43	51,4	4,71	88,89
ДК-80	3,77	63,8	12,79	58,88	14,05	43,4	6,03	84,79
МИКС	3,33	71,6	7,49	58,29	16,27	40,7	8,43	92,08

Действие реагентов во флотационном процессе обусловлено многими факторами, одним из которых является процесс пенообразования. При флотации продуктов динамической классификации измельченной в КИ-0,36 графитовой спели в присутствии реагентов ДК-80 и МИКС наблюдалось более интенсивное образование минерализованной пены по сравнению с флотацией керосином. Увеличение пенообразования при контакте аналогичных реагентов с твердой фазой отмечается и в работе [11]. Изучение свойств двухфазных пен показало, что реагенты ДК-80 и МИКС, имеющие в своем составе диметилэтилкарбинол и его производные, несмотря на наличие гидроксильной группы, пенообразующими свойствами в своих растворах не обладают. Однако в их присутствии увеличивается пенообразование растворов ВКП (рис. 5). По мнению производителей реагентов [11], увеличение пенообразования обусловлено удлинением гидрофобной части молекул за счет их сцепления и повышения эластичности воздушных пузырьков.

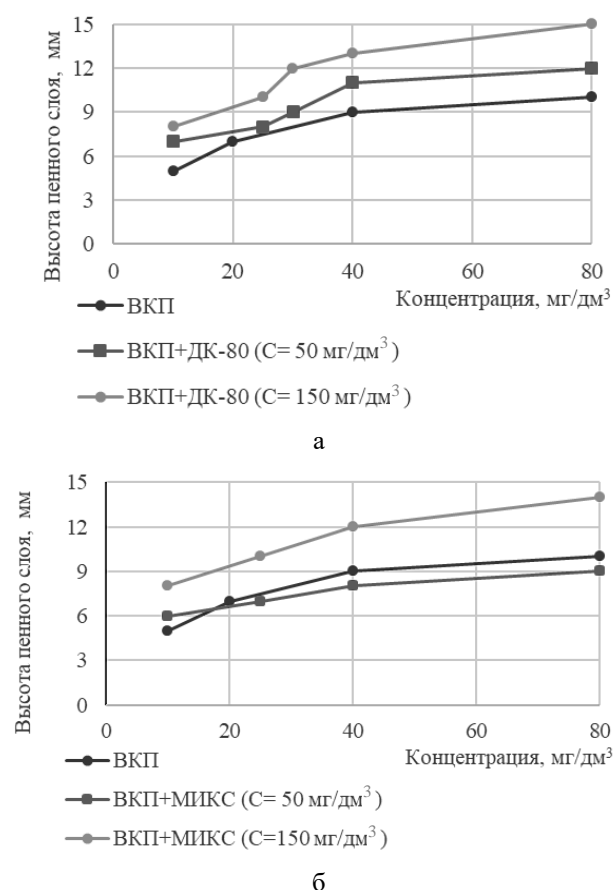


Рис. 5. Влияние концентрации реагентов ДК-80 (а) и МИКС (б) на пенообразующую способность растворов высококипящего продукта (ВКП)
Fig. 5. Influence of the concentration of reagents DK-80 (a) and MICS (б) on the foaming ability of solutions of high-boiling products (HBP)

Полученные результаты исследования свойств двухфазных пен и влияния реагентов с ацетиленовой связью на показатели флотации продуктов механоактивирующего центробежно-ударного измельчения графитовой спели могут быть положены в основу разработки технологии обогащения графитовой спели с использованием колонных флотомаши, характеризующихся высокой селективностью за счет процессов вторичного обогащения в пенном слое.

Закключение

Чешуйки графита, входящие в состав железографитовой спели доменного цеха, характеризуются загрязнением их поверхности и межслоевого пространства сферическими частицами оксидов железа. Это придает практически всем частицам пробы магнитные свойства и предопределяет неэффективность магнитного удаления железосодержащих примесей. Селективное выделение графита из графитизированной доменной пыли возможно с использованием флотации.

Увеличение продолжительности мокрого помола стальными шарами в барабанной мельнице не оказывает существенного влияния на результаты флотации железографитовой спели. При этом показатели флотации выше при использовании разбавленных пульп.

Сухой помол с механоактивацией в центробежно-ударной мельнице обеспечивает селективную дезинтеграцию частиц спели и увеличение реакционной способности графитовых частиц, что обуславливает повышение качества объединенных графитовых концентратов флотации крупного и мелкого продуктов по массовой доле углерода на 19,77% и уменьшение содержания магнитной фракции на 22,15% при увеличении потерь углерода с хвостами на 8,31%.

Флотационные реагенты ДК-80 и МИКС с действующим веществом диметилэтилкарбинолом, имеющим в своем составе ацетиленовую связь, проявляют различную флотационную активность по отношению к графиту, перераспределенному в результате динамической классификации в крупный и мелкий продукты. При флотации крупного продукта реагенты проявляют большую селективность к графиту, но и обуславливают загрязнение магнитными частицами и низкое извлечение углерода. При флотации мелкого продукта флотоактивность реагентов к графиту ниже, но по массовой доле магнитных частиц концентраты чище и извлечение углерода выше.

Растворы реагентов с диметилэтинилкарбинолом не обладают пенообразующими свойствами, но способствуют увеличению пенообразования в двухфазной системе с ВКП и при контакте с твердой фазой. Данная способность реагентов может быть использована при разработке технологии флотации графитовой спели с использованием колонных флотомашин, характеризующихся повышением селективности флотации за счет процессов вторичного обогащения в пенном слое.

Список источников

1. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году» / Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Федеральное агентство по недропользованию (Роснедра). Москва: ФГБУ «ВИМС», 2021. 572 с.
2. Combining multiple methods for recycling of Kish graphite from steelmaking slags and oil sorption performance of Kish-based expanded graphite / Li J., Liu R., Ma L., Wei L., Cao L., Shen W., Huang Z.H. // ACS omega. 2021. Т. 6. №. 14. С. 9868-9875.
3. Фадеева Н.В., Орехова Н.Н., Горлова О.Е. Экологические, экономические и ресурсные аспекты переработки графитсодержащей пыли металлургического производства // Современные проблемы и перспективы развития науки, техники и образования: материалы I Национальной научно-практической конференции (30 ноября 2020 г.). Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2020. С. 1229-1232.
4. Фадеева Н.В., Орехова Н.Н., Горлова О.Е. Изучение особенностей вещественного состава и технологических свойств металлургической графитсодержащей пыли для получения чешуйчатого графита // Актуальные проблемы горного дела. №3 (12). 2021. С. 20-27.
5. Laverty P.D., Nicks L.J., Walters L.A. Recovery of Flake Graphite from Steelmaking Kish; RI 9512; Bureau of Mines: United States, 1995, pp. 3-23.
6. Kazmi K.R., Anwar M.S., Bhatti M.A., Mehmood A. Kish beneficiation by flotation. Journal-Chemical Society of Pakistan. 2008, 30(1):11-15.
7. Frost R. The recovery of kish graphite from secondary sources. University of Birmingham, Birmingham, 2015.
8. Чижевский В.Б., Фадеева Н.В., Гмызина Н.В. Флотированность графита углеводородами и кислородсодержащими соединениями // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т. 16. №3. С. 5-16.
9. Влияние ацетиленовых спиртов на флотацию углей / Петухов В.Н., Щелкунов С.А., Малышев О.А., Кубак Д.А., Юдина С.В. // Кокс и химия. 2020. №11. С. 24-33.
10. Чижевский В.Б., Фадеева Н.В. Изучение действия вспенивателя PAC при флотации графита // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2003. №4. С. 37-41.
11. Tong Z. et al. The effect of comminution on surface roughness and wettability of graphite particles and their relation with flotation // Minerals Engineering. 2021. Т. 169. С. 106959.
12. Исследование измельчаемости природных скрытокристаллических графитов / Т.Р. Гильманшина, И.Е. Илларионов, Г.А. Королева, С.И. Лыткина // Обогащение руд. 2018. №4. С. 6-10.
13. Применение механоактивации для получения целевых продуктов при переработке плавного периклаза и шлаков / М.С. Гаркави, Н.Н. Орехова, О.Е. Горлова, Е.В. Колодежная // Обогащение руд. 2020. №5. С. 35-42.
14. Щелкунов С.А., Малышев О.А. Диметил(изопропенил-этинил)карбинол – эффективный неионогенный собиратель-вспениватель // Цветная металлургия. 2008. №3. С. 7-12.
15. Федотов К.В., Дмитриев В.И. Энергоемкость и энергонапряженность в процессах дезинтеграции руды // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2010. №2. С. 202-205.

References

1. Gosudarstvennyi doklad «O sostoyanii i ispolzovanii mineralno-syrevykh resursov Rossiiskoy Federatsii v 2020 godu» [State Report "On the State and Use of Mineral Resources of the Russian Federation in 2020"]. The Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation. Federal Agency for Subsoil Use (Rosnedra). Moscow: All-Russian Research Institute of Mineral Resources, 2021, 572 p. (In Russ.)
2. Li J., Liu R., Ma L., Wei L., Cao L., Shen W., Huang Z.H. Combining multiple methods for recycling of kish graphite from steelmaking slags and oil sorption performance of kish-based expanded graphite. ACS Omega, 2021, 6 (14), 9868-9875.
3. Fadeeva N.V., Orekhova N.N., Gorlova O.E. Environmental, economic and resource aspects of processing graphite-containing dust of metallurgical production. *Sovremennye problemy i perspektivy razvitiya nauki, tekhniki i obrazovaniya: materialy I Natsionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (30 noyabrya 2020 g.)* [Current problems and prospects for development of science, technology and education: Proceedings of the 1st National Scientific and Practical Conference (November 30, 2020)]. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2020, pp. 1229-1232. (In Russ.)
4. Fadeeva N.V., Orekhova N.N., Gorlova O.E. The study on features of the material composition and technological properties of metallurgical graphite-containing dust for producing flake graphite. *Aktualnye problemy gornogo dela* [Current Challenges of Mining], 2021, no. 3 (12), pp. 20-27. (In Russ.)

5. Laverty P. D., Nicks L.J., Walters L.A. Recovery of flake graphite from steelmaking kish. RI 9512; Bureau of Mines: United States, 1995, 3-23.
6. Kazmi K.R., Anwar M.S., Bhatti M.A. Mehmood A. Kish beneficiation by flotation. Journal-Chemical Society of Pakistan, 2008, 30(1), 11-15.
7. Frost R. The recovery of kish graphite from secondary sources. University of Birmingham, Birmingham, 2015.
8. Chizhevskiy V.B., Fadeeva N.V., Gmyzina N.V. Floatability of graphite with hydrocarbons and oxygen-containing compounds. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2018, vol. 16, no. 3, pp. 5-16. (In Russ.)
9. Petukhov V.N., Shchelkunov S.A., Malyshev O.A., Kubak D.A., Yudina S.V. Influence of acetylenic alcohols on coal flotation. *Koks i khimiya* [Coke and Chemistry], 2020, no. 11, pp. 24-33. (In Russ.)
10. Chizhevsky V.B., Fadeeva N.V. Study of the RAS foaming agent action in graphite flotation. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2003, no. 4, pp. 37-41. (In Russ.)
11. Tong Z. et al. The effect of comminution on surface roughness and wettability of graphite particles and their relation with flotation. *Minerals Engineering*, 2021, 169, 106959.
12. Gilmanshina T.R., Illarionov I.E., Koroleva G.A., Lytkina S.I. Study on grindability of natural cryptocrystalline graphite. *Obogashchenie rud* [Ore Beneficiation], 2018, no. 4, pp. 6-10. (In Russ.)
13. Garkavi M.S., Orekhova N.N., Gorlova O.E., Kolodezhnaya E.V. Application of mechanical activation for manufacturing target products in processing of fused periclase and slags. *Obogashchenie rud* [Ore Beneficiation], 2020, no. 5, pp. 35-42. (In Russ.)
14. Shchelkunov S.A., Malyshev O.A. Dimethyl (isopropenyl-ethinyl) carbinol is an efficient non-ionized collector-foaming agent. *Tsvetnaya metallurgiya* [Non-Ferrous Metallurgy], 2008, no. 3, pp. 7-12. (In Russ.)
15. Fedotov K.V., Dmitriev V.I. Energy intensity and power density in the ore disintegration processes. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2010, no. 2, pp. 202-205. (In Russ.)

Поступила 28.11.2022; принята к публикации 05.12.2022; опубликована 22.12.2022
Submitted 28/11/2022; revised 05/12/2022; published 22/12/2022

Фадеева Наталья Владимировна – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: natali_fadeeva@mail.ru. ORCID 0000-0001-9291-9927

Орехова Наталья Николаевна – доктор технических наук, профессор кафедры геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: n_orehova@mail.ru. ORCID 0000-0002-3507-5198

Колодежная Екатерина Владимировна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник НИС, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: kev@uralomega.ru.

Нигматова Найля Нуровна – студентка кафедры геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: nailya_nigmatovann@mail.ru.

Natalia V. Fadeeva – PhD (Eng.), Senior Lecturer, Department of Geology, Mine Survey and Minerals Dressing, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: natali_fadeeva@mail.ru. ORCID 0000-0001-9291-9927

Natalia N. Orekhova – DrSc (Eng.), Professor, Department of Geology, Mine Survey and Minerals Dressing, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: n_orehova@mail.ru. ORCID 0000-0002-3507-5198

Ekaterina V. Kolodezhnaya – PhD (Eng.), Senior Researcher, Research and Innovation Sector, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: kev@uralomega.ru.

Nailya N. Nigmatova – student of the Department of Geology, Mine Survey and Minerals Dressing, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: nailya_nigmatovann@mail.ru.

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ METAL FORMING

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

УДК 669.715-17

DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-4-47-57



РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА БЕССЛИТКОВОЙ ПРОКАТКИ-ПРЕССОВАНИЯ ПРУТКОВ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 6082

Сидельников С.Б., Берсенева А.С., Горбунов Ю.А., Загиров Н.Н., Лопатина Е.С.,
Ворошилов Д.С., Дурнопьянов А.В.

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

Аннотация. Совершенствование технологий производства длинномерных деформированных полуфабрикатов из алюминиевых сплавов в виде прутков, профилей, проволоки и т.п. является актуальной задачей металлургического производства. Особенно это важно для получения пресс-изделий малого поперечного сечения, так как технологии их производства в настоящее время характеризуются сравнительно высокой трудо- и энергоемкостью. В представленной работе решается задача снижения этих технико-экономических показателей за счет применения метода бесслитковой прокатки-прессования, позволяющего за один цикл и в одном узле обработки получать из расплава металла такие пресс-изделия в непрерывном режиме работы оборудования. Для выполнения этой задачи применительно к получению прутков из алюминиевого сплава 6082 выполнены теоретические и экспериментальные исследования, результаты которых дают возможность рекомендовать разработанную технологию для внедрения в производство. Так, с применением вариационного принципа минимума полной мощности и баланса мощностей определены реализуемость и основные технологические параметры процесса бесслитковой прокатки-прессования для получения прутков малого поперечного сечения из исследуемого сплава. Результаты экспериментальных исследований, которые проведены на установке совмещенной обработки СЛИПП-2,5, показали, что уровень механических свойств прутков из сплава 6082, полученных методом бесслитковой прокатки-прессования, соответствует требованиям международных стандартов и сопоставим с уровнем свойств прутков из этого сплава, изготовленных в производственных условиях методом горячего прессования. Установлено также, что для случая прокатки-прессования на установке с размерами калибра 19×42 мм максимальное усилие при температуре 400°C на валках и матрице не превышает 1 МН, в то время как при циклическом прессовании по традиционной технологии применяется пресс усилием 20 МН. Результаты проведенных исследований рекомендуются также для разработки технологии производства калиброванных прутков из сплава 6082, получаемых волочением из полученных бесслитковой прокатки-прессования горячепрессованных прутков.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, бесслитковая прокатка-прессование, прессование, прутки, энергосиловые параметры, отжиг, механические свойства

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

© Сидельников С.Б., Берсенева А.С., Загиров Н.Н., Лопатина Е.С., Ворошилов Д.С., Дурнопьянов А.В., 2022

Для цитирования

Разработка и исследование процесса бесслитковой прокатки-прессования прутков из алюминиевого сплава 6082 / Сидельников С.Б., Берсенева А.С., Загиров Н.Н., Лопатина Е.С., Ворошилов Д.С., Дурнопьянов А.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №4. С. 47-57. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-47-57>



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

DEVELOPING AND STUDYING THE PROCESS OF DIRECT EXTROLLING OF RODS FROM ALUMINUM ALLOY 6082

Sidelnikov S.B., Bersenev A.S., Gorbunov Yu.A., Zagirov N.N., Lopatina E.S., Voroshilov D.S., Durnopyanov A.V.

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Abstract. Improvement of technologies for the production of long deformed semi-finished products from aluminum alloys in rods, sections, wire, and other types of the products is a currently relevant objective of metallurgical production. This is especially important for manufacturing extruded products of a small cross-section, since their production technologies are currently characterized by relatively high labor and energy intensity. This paper describes how the problem of reducing these technical and economic indicators is solved by using the direct extrolling method contributed to manufacturing such extruded products from the melt in a single cycle and in one processing unit of continuously operated equipment. To accomplish this objective regarding the production of rods from aluminum alloy 6082, the authors carried out theoretical and experimental studies, whose results contributed to recommending the developed technology for implementation in production. Thus, using the variational principle of minimum total power and power balance, the authors determined feasibility and main technological parameters of the direct extrolling process for producing rods of a small cross-section from the alloy under study. The experimental studies carried out on the CCRE-2.5 combined processing unit (combined casting, rolling and extrusion) showed that mechanical properties of rods from alloy 6082 produced by the direct extrolling method met the requirements of international standards and were comparable to the properties of rods from this alloy manufactured under production conditions by hot extrusion. It has also been found that in case of rolling and extrusion on a unit with a caliber of 19×42 mm maximum force at 400°C on the rolls and the die does not exceed 1 MN, while in case of cyclic extrusion according to the conventional technology an extruder with a force of 20 MN is used. The results of the studies performed are also recommended for developing the technology for the production of calibrated rods from alloy 6082 manufactured by drawing of hot extruded rods manufactured by direct extrolling.

Keywords: aluminum alloys, direct extrolling, extrusion, rods, power parameters, annealing, mechanical properties

The research was carried out as part of the state order for research received by Siberian Federal University, project No. FSRZ-2020-0013.

For citation

Sidelnikov S.B., Bersenev A.S., Gorbunov J.A., Zagirov N.N., Lopatina E.S., Voroshilov D.S., Durnopyanov A.V. Developing and Studying the Process of Direct Extrolling of Rods from Aluminum Alloy 6082. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 4, pp. 47-57. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-47-57>

Введение

Деформированные полуфабрикаты из сплавов системы Al-Mg-Si находят широкое применение в таких отраслях промышленности, как строительство, авиа- и судостроение, электротехника, а также в сельском хозяйстве [1]. Это объясняется тем, что такие сплавы характеризуются высокой коррозионной стойкостью, необходимой прочностью и технологичностью при обработке давлением, для чего в промышленности применяется горячее прессование [2, 3].

В их многообразии выделяются прессованные и калиброванные прутки [4, 5] диаметром от 8 до 16 мм из сплава 6082 (аналог сплава АД35), которые поставляются по международным стандартам (EN и ASTM) на экспорт в страны Ближнего и Дальнего Зарубежья. Для их изготовления используется сплав 6082, химический состав которого приведен в **табл. 1** [6].

Деформированные полуфабрикаты из сплава 6082 упрочняются путем проведения закалки на столе прессы при температуре 515-525°C и охлаждения в воде и последующего естественного или искусственного старения при температуре 160-170°C и выдержке 10-12 часов. Механические свойства для прессованных и калиброванных прутков диаметром до 16 мм из сплава 6082 для наиболее распространенных состояний поставки [7] представлены в **табл. 2**.

Прессованные и калиброванные прутки из алюминиевых сплавов системы Al-Mg-Si широко используются в разных областях промышленности, для производства которых применяют традиционные процессы прокатки, прессования и холодного волочения. Однако их применение связано с высокой трудо- и энергоемкостью, так как они характеризуются либо цикличностью (прессование), либо многочисленными обжатиями и большим количеством переходов (прокатка и волочение).

Таблица 1. Химический состав сплава 6082 по EN 573-3
Table 1. Chemical composition of alloy 6082 as per EN 573-3

Содержание компонентов, %									
Al	Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Ti	Примеси
Основа	0,7-1,3	0,6-1,2	0,5	0,10	0,4-1,0	0,25	0,20	0,10	Не более 0,05, в сумме не более 0,15

Таблица 2. Механические свойства прутков из сплава 6082
Table 2. Mechanical properties of rods from alloy 6082

Сплав, вид продукции	Стандарт	Состояние поставки	Временное сопротивление, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Твердость, НВ
6082 (прессованный)	EN 755-2	T4 естественно состаренные	205	110	14	70
		T6 искусственно состаренные	295	250	8	95
6082 (калиброванный)	EN 754-2	T4 естественно состаренные	205	110	14	70
		T6 искусственно состаренные	310	255	10	95

В последнее время для производства длинномерных деформированных полуфабрикатов малого поперечного сечения из алюминиевых сплавов все чаще применяют совмещенные и комбинированные процессы обработки металла (рис. 1, а), использование которых позволяет реализовать большие степени деформации при непрерывном режиме обработки [8]. Одним из таких методов является метод бесслитковой прокатки-прессования (БПП), при котором операции непрерывного литья совмещены с обжатием закристаллизованной в валках заготовки и выдавливанием ее через калибрующее отверстие матрицы.

В связи с этим целью данной работы является теоретический анализ совмещенной обработки и экспериментальное опробование процесса бесслитковой прокатки-прессования (БПП) для совершенствования технологии получения прутков из алюминиевого сплава 6082.

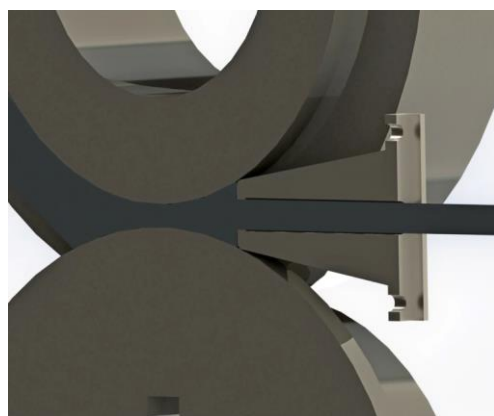
Материалы и методы исследования

В качестве материалов для исследований использовали сплав 6082 (см. табл. 1).

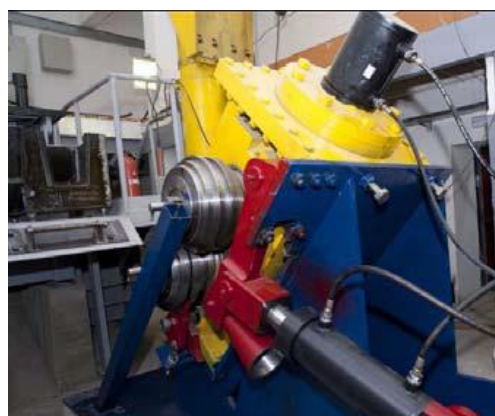
Для проведения исследований применили метод бесслитковой прокатки-прессования [8], который был реализован на установке совмещенного литья и прокатки-прессования СЛиПП-2,5 (рис. 1, б).

При этом процесс БПП реализуется в непрерывном режиме, а полученный полуфабрикат сматывается на приемное устройство (моталку). Применение операции сортовой прокатки в этой схеме позволяет создать непрерывность обработки и необходимые силы активного трения для выдавливания готового изделия. Прессование дает возможность получать заданные с помощью матрицы конфигурацию и размеры изделий при высоких степенях деформации, что дает возможность производить их в одной прокатной клети за один цикл обработки. Совмещение этих операций с непрерывным литьем на установках СЛиПП (см. рис. 1) позволяет существенно сократить количество технологических переделов и снизить трудо- и энергоемкость технологического процесса. Особенно это актуально для малопластичных и нетехнологичных сплавов, которые трудно поддаются деформации с помощью традиционных методов обработки, поэтому на практике для изготовления полуфабрикатов из них приходится применять дискретные методы прессования с получением изделий ограниченной длины на прессах большой мощности.

Для анализа изучаемого процесса использовали данные по безразмерным и геометрическим параметрам (табл. 3) для различных установок совмещенной обработки [8], технические характеристики которых представлены в табл. 4.



а



б

Рис. 1. Схема процесса совмещенной прокатки-прессования (а) и установка совмещенного литья и прокатки-прессования СЛиПП-2,5 (б)

Fig. 1. Process flow chart of combined rolling and extrusion (a) and combined casting, rolling and extrusion unit CCRE-2.5 (б)

Таблица 3. Данные для расчета процесса совмещенной обработки

Table 3. Data for calculating the combined treatment process

Величина	Наименование установки			Безразмерный параметр
	СПП-200	СЛиПП-2,5	СЛиПП-4	
Начальный диаметр валков D_0 , мм	200	400	400	—
Диаметр валка с выступом D_1 , мм	214	462	428	—
Диаметр валка с канавкой D_2 , мм	164	394	428	—
Минимальная высота калибра h , мм	7	10	19	—
Средний диаметр валков D_0 , мм	189	428	428	$A = \frac{D_0 - h}{h}$
Ширина калибра b , мм	15	22	42	$\tilde{b} = \frac{b}{h}$
Начальная высота заготовки h_0 , мм	14	20	42	$\tilde{h}_0 = \frac{h_0}{h}$
Начальная ширина заготовки b_0 , мм	14	20	40	$\tilde{b}_0 = \frac{b_0}{h}$
Высота зеркала матрицы h_m , мм	20	25	31	$\tilde{h}_m = \frac{h_m}{h}$
Диаметр пресс-изделия d , мм	7-9	9-12	9-15	$\tilde{h}_1 = \frac{d}{h}$

Таблица 4. Технические характеристики установок совмещенной обработки

Table 4. Technical performance of combined treatment units

Параметры	СПП-200	СЛиПП-2,5	СЛиПП-4
Начальный диаметр валка, мм	200	480	480
Длина бочки валка, мм	240	250	400
Диаметр шейки вала, мм	100	150	300
Количество оборотов валка, об/мин	4, 8, 14	1-15	1-30
Передаточное число редуктора, ед.	40	40	100
Мощность электродвигателя, кВт	20	45	100
Момент на выходном валу, кН·м	10	20	40
Рабочее давление гидростанции, кгс/см ²	200-500	200	—
Максимальное усилие прижима, кН	300	300	1000

Полученные результаты и их обсуждение

Теоретический анализ процесса совмещенной прокатки-прессования показал, что для реализации процесса должно выполняться условие баланса мощностей, то есть суммарная мощность активных сил трения N_a должна быть равна (или больше) мощности реактивных сил N_p , расходуемых на осуществление деформации и преодоление трения в очаге деформации и на поверхностях инструмента, то есть $N_a - N_p = 0$. Если это условие не выполняется, возможен случай проскальзывания валков относительно заготовки, и процесс выдавливания металла становится невозможным. В качестве критерия оценки реализуемости процесса принят условный коэффициент запаса мощности K_N , рассчитываемый как отношение мощности N_a к мощности N_p , причем если его значение больше 1, то выдавливание металла через матрицу становится возможным и вероятность его увеличивается с ростом этого коэффициента [9].

На рис. 2 приведены данные расчета по этой методике для получения прутков из алюминиевого сплава 6082 в зависимости от различных условий контактного трения металла с валками и матрицей (ψ_m – показатель трения на зеркале матрицы, ψ_{Π} – показатель трения на пояске матрицы, ψ_v и $\psi_{ст}$ – показатели трения соответственно на поверхности валка и стенках валка с ручьем) способом совмещенной прокатки-прессования на различных установках.

Анализ данных, приведенных на рис. 2, показывает, что диаметр валков (рис. 2, а, б) существенно влияет на увеличение реализуемости процесса, однако с увеличением размеров калибра при одном и том же диаметре валков (рис. 2, б, в) коэффициент запаса мощности K_N снижается, что следует учитывать при проектировании установок совмещенной обработки.

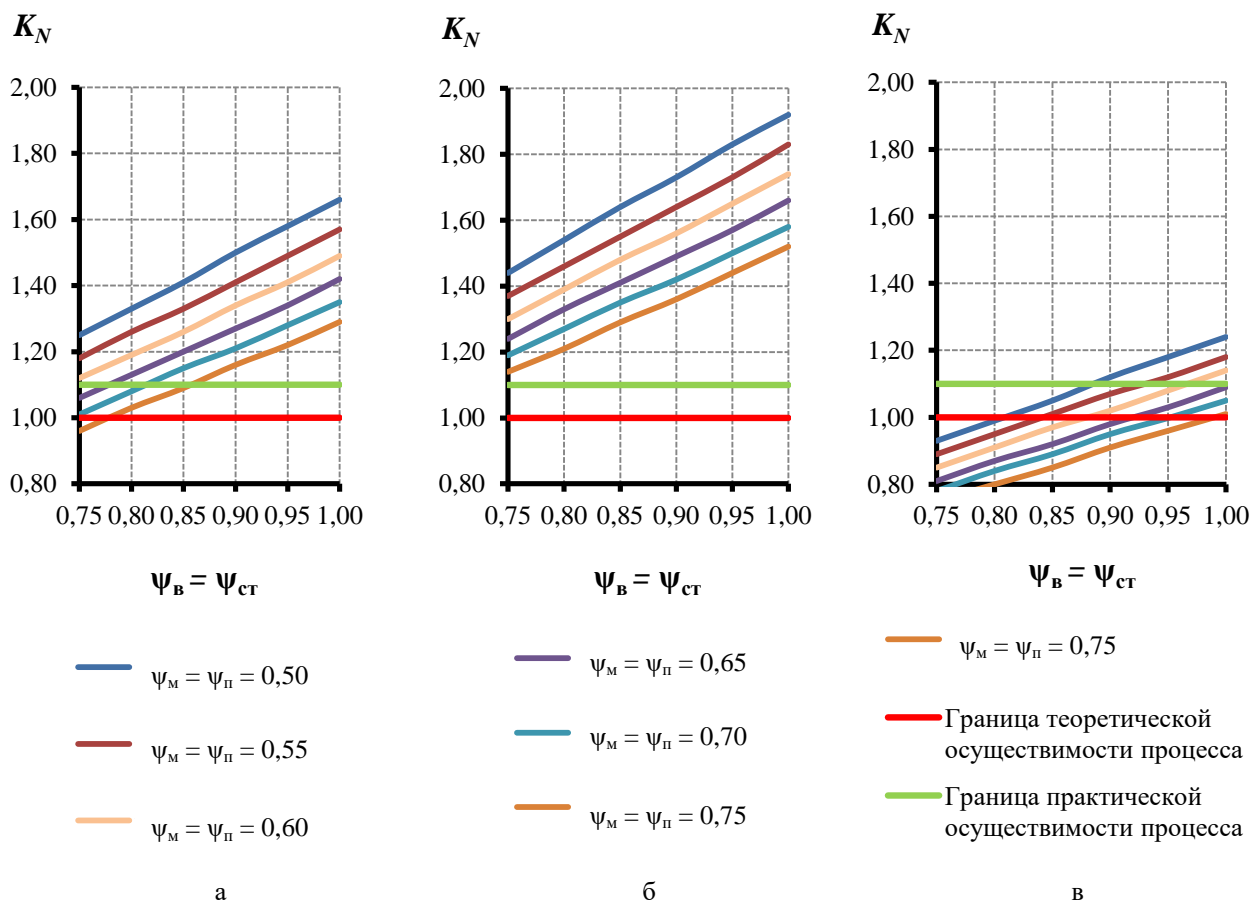


Рис. 2. Изменение коэффициента запаса мощности K_N в зависимости от условий трения:

а – для установки СПП-200; б – для установки СЛиПП-2,5; в – для установки СЛиПП-4

Fig. 2. Changes in excess power coefficient K_N depending on friction conditions: а is for combined rolling and extrusion unit CRE-200; б is for combined casting, rolling and extrusion unit CCRE-2.5; в is for combined casting, rolling and extrusion unit CCRE-4

С целью анализа формоизменения металла и энергосиловых параметров процесса совмещенной обработки была использована математическая модель прокатки-прессования в закрытых ящичных калибрах с использованием системы уравнений, включающей уравнение баланса мощностей и вариационное уравнение принципа минимума полной мощности:

$$\delta(N_{\text{вн}} + N_{\text{ср}} - N_{\text{ск}} - N_{\text{вал}}) = 0,$$

где $N_{\text{вн}}$ – мощность внутренних сил; $N_{\text{ср}}$ – мощность сил среза; $N_{\text{ск}}$ – мощность напряжений трения на скоростях скольжения; $N_{\text{вал}}$ – подводящая валками мощность.

Для определения составляющих полной мощности использовали следующие формулы:

$$N_{\text{вн}} = \int_V 0,58\sigma_s H dV;$$

$$N_{\text{ср}} = \int_{F_{\text{ср}}} 0,58\sigma_s |V^+ - V^-| dF;$$

$$N_{\text{ск}} = - \int_{F_{\text{к}}} \tau_{\text{тр}} v_{\text{ск}} dF;$$

$$N_{\text{вал}} = \int_{F_{\text{к}}} \tau_{\text{тр}}^* v_{\text{в}} dF,$$

где H – интенсивность скоростей деформации сдвига; σ_s – сопротивление металла деформации; V^+ , V^- – проекции скорости течения металла на касательную плоскость к поверхности разрыва скоростей $F_{\text{ср}}$ соответственно с внутренней и внешней стороны этой поверхности; n – число поверхностей разрыва скоростей; $\tau_{\text{тр}}$ – напряжение трения; $\tau_{\text{тр}}^*$ – проекция полного напряжения трения на касательную к окружности вала в любой точке контактной поверхности.

Решение вариационной задачи позволило получить численный массив данных по величине сил, действующих на матрицу $P_{\text{матр}}$ и валки $P_{\text{вал}}$, в зависимости от безразмерных параметров процесса прокатки-прессования и формулы для расчета искомых величин, которые были использованы при расчетах энергосиловых параметров:

– для силы, действующей на матрицу,

$$P_{\text{матр}} = \frac{0,12\sigma_s (A-11,5)}{\sqrt{3}} \left[2\ln\mu(\tilde{b}+1)(L_1+L_2)h - \frac{\tilde{b}}{(A+1)}(L_1^2+L_2^2) + \frac{\ln\mu}{2h(A+1)}(L_1^3+L_2^3) - \frac{\tilde{b}h}{12(2hA+2h)^3}(L_1^4+L_2^4) + \frac{\ln\mu}{30(2hA+2h)^3}(L_1^5+L_2^5) \right];$$

– для силы, действующей на валки,

$$P_{\text{вал}} = (1,7 - 0,38A)\sigma_s \frac{4\tilde{b}h}{\sqrt{3}} \left[\left(\frac{h}{12h(A+1)} - 1 \right) \times \times (L_1 \ln(2h^2(A+1)+L_1^2) + L_2 \ln(2h^2A+2h^2+L_2^2)) - (L_1+L_2) \left(\frac{h}{12h(A+1)} - 1 \right) \ln(2h^2(A+1)) + \frac{3\ln\mu}{2\tilde{b}h}(L_1^2+L_2^2) - \frac{(L_1^3+L_2^3)}{12(2hA+2h)^2} + \frac{2\tilde{b}h}{\sqrt{3}} + \frac{\ln\mu}{\tilde{b}h} \left(\frac{\tilde{b}h\sqrt{2h(A+1)}}{\sqrt{h}} - \sqrt{2h^2(A+1)} \right) \times \times \left(L_1 \arctan \frac{L_1}{\sqrt{2h^2(A+1)}} + L_2 \arctan \frac{L_2}{\sqrt{2h^2(A+1)}} \right) \right],$$

где L_1 – длина зоны захвата при прокатке; L_2 – длина зоны распрессовки; μ – вытяжка при выдавливании.

С помощью полученных формул провели расчеты энергосиловых параметров для получения прутков различного диаметра на лабораторных установках СПИ-200 и СЛИП-2,5, а также опытно-промышленной установке СЛИП-4 Иркутского алюминиевого завода с использованием известных из справочной литературы реологических характеристик сплава 6082.

Расчет проводился для двух уровней температуры заготовки – $T_{\text{заг}} = 400^\circ\text{C}$ и $T_{\text{заг}} = 540^\circ\text{C}$, двух различных значений скорости деформации – $\xi = 0,30 \text{ с}^{-1}$ и $\xi = 1,02 \text{ с}^{-1}$, а также для трех вытяжек – $\mu = 4,4$, $\mu = 7,3$, $\mu = 14,3$, характеризующих степень деформации при выдавливании пресс-изделия. Значения энергосиловых параметров приведены в табл. 5.

Таблица 5. Энергосиловые параметры при обработке сплава 6082
Table 5. Power parameters during treatment of alloy 6082

Параметры		T _{заг} = 400°C			T _{заг} = 540°C		
		μ = 4,4	μ = 7,3	μ = 14,3	μ = 4,4	μ = 7,3	μ = 14,3
Установка СПП-200							
ξ = 0,30 с ⁻¹	P _{вал} , кН	140	148	157	76	81	85
	P _{матр} , кН	83	111	150	45	60	81
ξ = 1,02 с ⁻¹	P _{вал} , кН	172	181	191	90	95	100
	P _{матр} , кН	102	135	182	53	71	95
Установка СЛПП-2,5							
ξ = 0,30 с ⁻¹	P _{вал} , кН	290	306	323	158	166	175
	P _{матр} , кН	117	156	210	64	85	114
ξ = 1,02 с ⁻¹	P _{вал} , кН	354	374	394	185	195	205
	P _{матр} , кН	143	191	257	75	100	134
Установка СЛПП-4							
ξ = 0,30 с ⁻¹	P _{вал} , кН	725	766	806	394	416	438
	P _{матр} , кН	366	488	657	199	265	356
ξ = 1,02 с ⁻¹	P _{вал} , кН	885	934	983	462	487	513
	P _{матр} , кН	446	596	801	233	311	418

Из анализа данных видно, что для калибра размерами в минимальном сечении 7×15 мм даже при температуре 400°C усилие на валках не превышает 200 кН (20 т), а усилие на матрице – 182 кН. При этом с ростом вытяжки и то и другое усилие увеличивается. Повышение температуры до 540°C приводит к снижению усилия практически в 2 раза. Рост скорости деформации (скорости вращения валков) приводит к скоростному упрочнению металла и росту энергосиловых параметров процесса.

Для калибра размерами в наименьшем сечении 10×22 мм максимальные усилия и на валках и на матрице при увеличении размеров калибра растут и достигают соответственно 394 и 257 кН при скорости деформации ξ = 1,02 с⁻¹, температуре заготовки T_{заг} = 400°C и, вытяжке μ = 14,3. Для калибра с максимальными размерами 19×42 мм для опытно-промышленной установки СЛПП-4 максимальное усилие при температуре 400°C на валках и матрице не превышает 1000 кН (100 т). Обработку исследуемых сплавов рекомендуется проводить при температуре 540°C, что приведет к снижению усилий до 500 кН. Остальные тенденции изменения энергосиловых параметров остаются такими же, как и при обработке на установке СПП-200.

Таким образом, с применением полученных теоретическим путем формул, рассчитаны энер-

госиловые параметры процесса совмещенной прокатки-прессования для различных параметров очага деформации и условий обработки, что позволяет проектировать оборудование и технологию совмещенной обработки для получения прутков из сплава 6082. Следует отметить, что максимальная величина силовой загрузки оборудования не превышает 1 МН, в то время как при производстве прутков такого же диаметра в производственных условиях используют горизонтальный гидравлический пресс усилием 20 МН.

Полученные в данной работе данные позволили спланировать и осуществить экспериментальные исследования по получению прутков из сплава 6082 и подготовить данные для запуска технологии на опытно-промышленной установке СЛПП-2,5 (рис. 3). В целом проведенные исследования показали, что для достижения заданных свойств калиброванных прутков необходимо уточнение режимов нагрева расплава и корректировка температуры его обработки в валках, а также режимов закалки и старения.

Для получения прутков диаметром 8 мм использовали линию совмещенной обработки, включающую в качестве основных агрегатов печь-миксер, деформирующий узел установки СЛПП-2,5 (см. рис. 3), а также линию охлаждения, калибровочную машину и моталку.

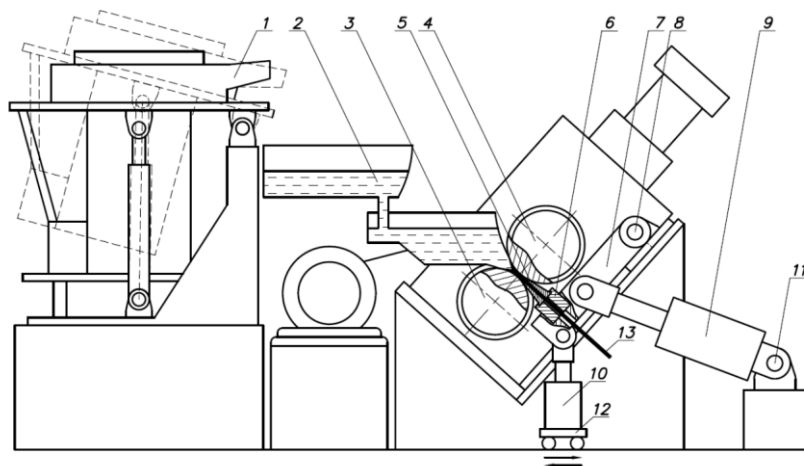


Рис. 3. Общий вид установки СЛиПП-2,5: 1 – печь-миксер; 2 – литниковая система; 3 – валок с ручьем; 4 – валок с выступом; 5 – матрица; 6 – матрицедержатель; 7 – кронштейн; 8, 11, 12 – шарниры; 9 – наклонный гидроцилиндр; 10 – вертикальный гидроцилиндр; 13 – пресс-изделие

Fig. 3. General view of combined casting, rolling and extrusion unit CCRE-2.5: 1 is a holding furnace; 2 is a feed system; 3 is a roll with the pass; 4 is a ridged roll; 5 is a die; 6 is a die holder; 7 is a support; 8, 11, 12 are joints; 9 is a tilting hydraulic cylinder; 10 is a vertical hydraulic cylinder; 13 is an extruded product

Неподвижная матрица находилась в постоянном контакте с подвижными валками, образующими закрытый ящичный калибр прямоугольного сечения. Поэтому при реализации процесса БПП особенно важно обеспечить конструктивно и технологически рациональный зазор на контакте рабочих валков и матрицы. С одной стороны, при минимальном зазоре интенсивно возрастает сила трения и увеличивается абразивный износ рабочего инструмента, а с другой – при увеличении зазора возможно появление заусенца с повышенной толщиной из деформируемого металла, что нарушает стабильность протекания непрерывного процесса обработки, ухудшает качество пресс-изделия и снижает выход годного. Поэтому прижимное устройство матрицы к валкам должно обеспечивать в рабочем положении регламентируемую толщину заусенца из деформируемого металла на валках, то есть усилие прижима должно удерживать матрицу в заданном положении и обеспечивать равномерное нагружение на рабочие валки. Поэтому была предложена конструкция прижимного узла [10], которая предназначена для предотвращения перемещения верхнего валка в момент распрессовки металла в калибре и обеспечения заданной величины зазора между валками и матрицей.

Экспериментальные исследования проводили в несколько этапов, выявляя на каждом недостатки конструкции оборудования, инструмента

и варьируя технологические параметры процесса совмещенной обработки.

На установке СЛиПП-2,5 получили прутки диаметром 8 мм из сплава 6082 по технологии совмещенного литья и прокатки-прессования длиной до 30 м. Для оценки свойств полученного деформированного полуфабриката его сравнивали с прутком, полученным методом прямого прессования на прессе усилием 20 МН из литой гомогенизированной заготовки диаметром 162 мм из сплава 6082 по следующему режиму: температура заготовки $T_{\text{заг}} = 490-510^\circ\text{C}$, температура контейнера $T_{\text{кон}} = 440-460^\circ\text{C}$, скорость прессования 0,8 мм/с.

Результаты испытаний механических свойств прутков в исходном и термообработанном состоянии представлены в табл. 6. Термообработку прутков, полученных прессованием в производственных условиях, и прутков, изготовленных на установке СЛиПП, проводили в лабораторных условиях по следующим режимам: температура закалки $T_z = 530-540^\circ\text{C}$, температура старения $T_{\text{ст}} = 160-170^\circ\text{C}$, время выдержки $\tau_b = 7$ и 10 ч.

Результаты испытаний показали, что уровень механических характеристик прессованных прутков после термообработки, произведенных по разным технологиям, соответствует требованиям стандарта EN 755-2 сплава 6082 состояние T6 [10]. При этом прочностные свойства горячепрессованных прутков, полученных БПП, выше, чем прутков, полученных горячим прессованием.

Таблица 6. Механические свойства прутков, произведенных по разным технологиям из сплава 6082
Table 6. Mechanical properties of rods manufactured by different technologies from alloy 6082

Технология	Диаметр прутка, мм	Состояние	Временное сопротивление, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %
БПП	7,8+0,2	Горячепрессованное	290	268	12,0
			284	260	12,3
			269	251	12,2
		Отожженное T _з = 530-540°C, T _{ст} = 160-170°C, τ _в = 7 ч	286	241	16,8
			249	198	16,0
			255	201	16,2
		T _з = 530-540°C, T _{ст} = 160-170°C, τ _в = 10 ч	343	287	19,5
			343	280	18,5
			331	276	17,7
Прессование	7,9+0,1	Горячепрессованное	186	100	23,5
			187	101	23,8
			187	101	23,8
		Отожженное T _з = 530-540°C, T _{ст} = 160-170°C, τ _в = 7 ч	387	343	15,0
			387	345	16,0
			382	338	15,5
		Отожженное T _з = 530-540°C, T _{ст} = 160-170°C, τ _в = 10 ч	385	347	12,5
			385	345	12,5
			387	351	13,5
Требования по EN 755-2 сплава 6082 состояние Т6 прессованного прутка диаметром < 20 мм			≥ 295	≥ 250	≥ 8

Заключение

Таким образом, проведенные исследования показали принципиальную возможность получения горячепрессованных прутков методом БПП с требуемым уровнем механических свойств. Дальнейшие исследования будут связаны с получением калиброванных прутков по схеме БПП – волочение с целью получения заданного стандартом уровня механических свойств и сравнение их с прутками, полученными по применяемой в производственных условиях традиционной технологии.

Список источников

- Горбунов Ю.А. Развитие производства проката и кабельно-проводниковой продукции из алюминиевых сплавов на заводах РФ // Цветные металлы – 2013: сб. науч. ст. Красноярск: Версо, 2013. С. 573-577.
- Баузер М., Зауэр Г., Зигерт К. Прессование. Справочное руководство / пер. с нем. по лицензии издательства Aluminium Verlag Marketing & Kommunikation GmbH. М.: Алусил МВнТ, 2009. С. 918.
- Логинов Ю.Н., Буркин С.П. Энергосбережение в процессах прессования // Цветные металлы. 2002. №10. С. 81-86.
- Пат. 2241781 Российская Федерация, МПК: C22F 1/047. Способ производства калиброванных прутков из сплавов системы алюминий-магний-кремний / Горбунов Ю.А., Усынина Г.П., Смирнова Л.А.,

Казаков В.Н., Швытков А.С. Оpubл. 10.12.2004, Бюл. №34.

- Praveen Kumar, Dr. Geeta Agnihotri / International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA) ISSN: 2248-9622 www.ijera.com. Vol. 3, Issue 3, May-Jun 2013, pp. 988-994.
- EN 573-3. Алюминий и алюминиевые сплавы. Химический состав и форма заготовки. Часть 3. Химический состав и форма изделия. 2013.
- EN 755-2. Алюминий и алюминиевые сплавы. Прессованные прутки, трубы и профили. Часть 2. Механические свойства. 2013.
- Особенности структурообразования и свойства металла при высокоскоростной кристаллизации-деформации и модифицировании алюминиевых сплавов: кол. монография / С.Б. Сидельников, Е.С. Лопатина, Н.Н. Довженко [и др.]. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. 180 с.
- Zagirov N., Dovzhenko N., Sidelnikov S., Bepalov V. Computational-and-Experimental Evaluation of the Implementation Condition of Combined Rolling-Pressing Using the Power Balance Method Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 2016, vol. 57, №2, pp. 90-95.
- Разработка технологии получения прутков методом совмещенного литья и прокатки-прессования на установке СЛиПП-2,5 из алюминиевых сплавов серии 6XXX и исследование их структуры и свойств / Сидельников С.Б., Берсенев А.С., Довженко Н.Н., Лопатина Е.С., Константинов И.Л., Самчук А.П. // Цветные металлы и минералы: сб. тез. докл. VIII Международного Конгресса. Красноярск, 2016. С. 306-307.

References

1. Gorbunov Yu.A. Development of the production of rolled products and cable and wire products from aluminum alloys at the plants of the Russian Federation. *Tsvetnye metally* – 2013: sb. nauch. st. [Non-Ferrous Metals – 2013: Collection of research papers]. Krasnoyarsk: Verso, 2013, pp. 573-577. (In Russ.)
2. Bauser M., Sauer G., Siegert K. *Pressovanie. Spravochnoe rukovodstvo* [Extrusion: Reference guide]. Moscow: Alyusil MViT, 2009, 918 p. (In Russ.)
3. Loginov Yu.N., Burkin S.P. Energy saving in extrusion processes. *Tsvetnye metally* [Non-Ferrous Metals], 2002, no. 10, pp. 81-86. (In Russ.)
4. Gorbunov Yu.A., Usynina G.P., Smirnova L.A., Kazakov V.N., Shvytkov A.S. *Sposob proizvodstva kalibrovannykh prutkov iz splavov sistemy alyuminiy-magniy-kremniy* [Method for the production of calibrated rods from aluminum-magnesium-silicon alloys]. Patent RU, no. 2241781, 2004.
5. Praveen Kumar, Dr. Geeta Agnihotri. International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA). ISSN: 2248-9622. www.ijera.com, vol. 3, Issue 3, May-Jun 2013, pp. 988-994.
6. EN 573-3 Aluminium and aluminium alloys – Chemical composition and form of wrought products – Part 3: Chemical composition and form of products, 2013.
7. EN 755-2 Aluminium and aluminium alloys – Extruded rod/bar, tube and profiles – Part 2: Mechanical properties, 2013.
8. Sidelnikov S.B., Lopatina E.S., Dovzhenko N.N. et al. *Osobennosti strukturoobrazovaniya i svoystva metalla pri vysokoskorostnoy kristallizatsii-deformatsii i modifitsirovaniy alyuminiyevykh splavov: kollektivnaya monografiya* [Peculiarities of structure formation and metal properties during high-speed crystallization-deformation and modification of aluminum alloys: collective monograph]. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2015, 180 p. (In Russ.)
9. Zagirov N., Dovzhenko N., Sidelnikov S., Bespalov V. Computational-and-experimental evaluation of the implementation condition of combined rolling-pressing using the power balance method. Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 2016, 57, 2, 90-95.
10. Sidelnikov S.B., Bersenev A.S., Dovzhenko N.N., Lopatina E.S., Konstantinov I.L., Samchuk A.P. Development of technology for the production of rods by combined casting and rolling-extrusion on combined casting, rolling and extrusion unit CCRE-2.5 from aluminum alloys of the 6XXX series and the study on their structure and properties. *Tsvetnye metally i mineraly: sb. tez. dokl. VIII Mezhdunarodnogo Kongressa* [Non-Ferrous Metals and Minerals: Collection of abstracts of the 8th International Congress]. Krasnoyarsk: 2016, pp. 306-307. (In Russ.)

Поступила 08.10.2022; принята к публикации 19.10.2022; опубликована 22.12.2022
Submitted 08/10/2022; revised 19/10/2022; published 22/12/2022

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

Берсенов Андрей Сергеевич – магистрант,
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: sibdrug@mail.ru.

Горбунов Юрий Александрович – доктор технических наук, профессор,
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: j.a.gorbunov@gmail.ru.

Загиров Николай Наильич – кандидат технических наук, доцент,
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: nzagiroff@mail.ru. ORCID 0000-0003-0144-5063

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

Ворошилов Денис Сергеевич – кандидат технических наук, заведующий кафедрой ОМД,
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: d.s.voroshilov@gmail.com. ORCID 0000-0002-1406-3665

Дурнопьянов Александр Васильевич – аспирант, инженер,
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: a.durnopyanov@yandex.ru.

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

Andrey S. Bersenev – master's student,
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: sibdrug@mail.ru.

Yuri A. Gorbunov – DrSc (Eng.), Professor,
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: j.a.gorbunov@gmail.ru.

Nikolay N. Zagirov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: nzagiroff@mail.ru. ORCID 0000-0003-0144-5063

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

Denis S. Voroshilov – PhD (Eng.), Head of the Metal Forming Department,
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: d.s.voroshilov@gmail.com. ORCID 0000-0002-1406-3665

Aleksandr V. Durnopyanov – postgraduate student, engineer,
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: a.durnopyanov@yandex.ru.

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.73
DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-4-58-66



АНАЛИЗ СХЕМЫ ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА В ПРОЦЕССАХ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПЛОСКОЙ ЗАГОТОВКИ

Соломонов К.Н.¹, Тищук Л.И.¹, Бахаев К.В.²

¹ Филиал Ростовского государственного университета путей сообщения, Воронеж, Россия

² Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия

Аннотация. Рассмотрена задача по созданию специализированного программного комплекса, способного моделировать картину течения металла в процессах горячей деформации плоских профилированных заготовок. Дана оценка традиционным кинематическим схемам течения металла – нормальной и радиальной. Результаты виртуального эксперимента, полученные с использованием программного комплекса DEFORM, который хорошо зарекомендовал себя при решении задач пластического формоизменения, показали, что при любых параметрах процесса осадки реальной является «промежуточная» кинематическая схема течения металла, которая состоит из зон течения по нормали к контуру и зон радиального течения. Предполагается, что для создания алгоритма расчета параметров осадки плоской заготовки допустимой можно считать нормальную кинематическую схему течения металла в условиях трения, которые сопровождают процессы горячей объемной штамповки иковки алюминиевых сплавов при наличии смазки. На основании этого допущения разработан программный комплекс EQUI, который позволяет моделировать картину течения металла по плоскости контакта инструмента и заготовки. Для компьютерного моделирования пространственной эпюры контактных напряжений и, как следствие, линий раздела течения металла предложена система автоматизированного проектирования КОМПАС, с помощью которой задача в напряжениях может быть сведена к задаче в перемещениях. Это возможно благодаря тому, что проекция твердотельной модели, которая представляет собой аналог пространственной эпюры контактных напряжений на плоскость контакта инструмента и заготовки, позволяет получить изображение линии раздела течения металла на контактной плоскости. Сравнение результатов, полученных в КОМПАС и EQUI, показывает хорошее совпадение.

Ключевые слова: плоская заготовка, деформация, осадка, картина течения металла, пространственная эпюра контактных напряжений, коэффициент трения, программный комплекс

© Соломонов К.Н., Тищук Л.И., Бахаев К.В., 2022

Для цитирования

Соломонов К.Н., Тищук Л.И., Бахаев К.В. Анализ схемы течения металла в процессах деформирования плоской заготовки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №4. С. 58-66. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-58-66>



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

ANALYSIS OF THE METAL FLOW DIAGRAM IN FLAT BAR FORMING PROCESSES

Solomonov K.N.¹, Tishchuk L.I.¹, Bakhaev K.V.²

¹ Branch of Rostov State Transport University, Voronezh, Russia

² Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

Abstract. The paper describes the development of a specific software suite applied to simulate a metal flow chart in hot forming processes of shaped flat bars. It contains an assessment of conventional kinematic metal flow diagrams: normal and radial ones. A virtual experiment conducted in DEFORM, showing good results in plastic forming, demonstrated that at any parameters of an upsetting process a real diagram was an “intermediate” metal flow kinematic diagram, consisting of zones of the flow along the normal to the circuit and zones of a radial flow. To develop an algorithm of calculating the flat bar upsetting parameters, it is assumed to consider as acceptable a normal kinematic diagram of a metal flow in friction conditions accompanying hot die forging and pressing of aluminum alloys with lubrication. Following this assumption, EQUI software suite was developed to simulate a metal flow chart along the contact plane of the tool and the bar. To carry out a computer simulation of a 3D contact stress drawing and, as a consequence, boundary lines of the metal flow, it is suggested to use KOMPAS automated design system, where a stress problem may be converted to a displacement problem. It is possible due to a projection of a solid model representing a similar 3D contact stress drawing on a plane of the contact between the tool and the bar, giving an image of the boundary line of the metal flow on the contact plane. The comparison of the results in KOMPAS and EQUI shows a good agreement.

Keywords: flat bar, forming, upsetting, metal flow chart, 3D contact stress drawing, friction coefficient, software suite

For citation

Solomonov K.N., Tishchuk L.I., Bakhaev K.V. Analysis of the Metal Flow Diagram in Flat Bar Forming Processes. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Novos Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 4, pp. 58-66. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-58-66>

Введение

Для моделирования картины течения металла по полотну плоской заготовки в условиях горячей деформации металлических образцов, в частности в процессахковки и объемной штамповки, когда значительное влияние на формообразование поковки оказывает трение, наиболее пригодной можно считать деформационную схему осадки. В этом случае для визуализации картины течения металла при деформировании плоской заготовки в условиях плоской деформации существенное значение имеет построение схемы течения металла, которая наиболее точно описывала бы особенности течения металла по полотну заготовки.

Оценка пригодности предельных кинематических схем течения металла

В «классической» литературе [1] представлены две предельные схемы течения металла по полотну образца при осадке плоской прямо-

угольной заготовки, описывающие распределение потоков металла на контактной поверхности, которые получили название «нормальная и радиальная кинематические схемы течения металла» (рис. 1). В соответствии с нормальной кинематической схемой течения металла линии тока направлены по нормали к контуру заготовки, благодаря чему прямоугольная пластина в ходе осадки должна превращаться в многоугольник. В соответствии с радиальной кинематической схемой течения металла почти все линии тока направлены вдоль радиусов некоторой окружности, под острым углом к контуру заготовки, и в процессе деформирования прямоугольная пластина, увеличиваясь в размерах, не должна менять своей формы. Ссылаясь на работы предшественников и ряда отечественных и зарубежных исследователей, можно утверждать, что вид кинематической схемы течения металла главным образом, но не только, зависит от коэффициента (показателя) трения. При этом нормальная кинематическая схема течения ме-

талла характерна для случая, когда трение максимальное, а радиальная – когда трение полностью отсутствует. Очевидно, что на практике оба варианта нереализуемы.

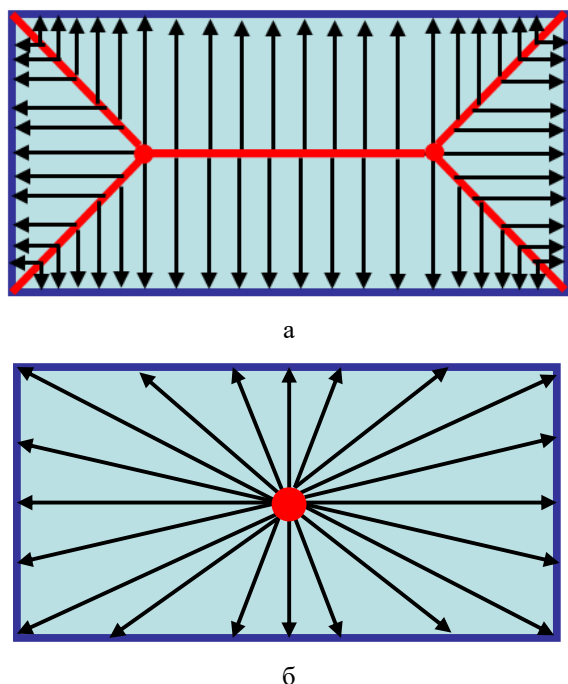


Рис. 1. Предельные схемы течения металла:
а – нормальная кинематическая схема;
б – радиальная кинематическая схема
Fig. 1. Limit metal flow diagrams: a is a normal kinematic diagram; б is a radial kinematic diagram

В реальных процессах осадки прямоугольник деформируется не в многоугольник, а в эллипс, а затем в окружность, и наблюдаются так называемые «ушки» – заостренные выступы в угловых зонах заготовки. Указанные результаты получены в натурных экспериментах [2]. Аналогичные эксперименты проводились на сравнительно тонких стальных и свинцовых образцах [3], отношение толщины которых к линейному размеру в плане было равно приблизительно 0,1. Описанные эксперименты, проводившиеся на протяжении многих лет разными исследователями, свидетельствуют о том, что в действительности имеет место некоторая «промежуточная» кинематическая схема течения металла, что согласуется с предположением, высказанным в [1], где описаны предельные случаи.

Попытки устранить противоречивость нормальной и радиальной схем и приблизить их к реальным условиям формообразования поковок предпринимали и другие исследователи [4]. Ими высказывалось мнение, что в начальный момент деформирования имеет место нормальная кинема-

тическая схема течения металла, а затем по ходу осадки на последующих этапах – «псевдонормальная», которая сочетает в себе элементы нормальной и радиальной кинематических схем течения металла: линии раздела течения металла расположены так же, как в нормальной, но линии тока направлены вдоль радиусов дуг некоторых окружностей, положение которых определяется граничными условиями. Тогда все-таки схему течения металла можно считать нормальной, но по отношению не к действительному, а к условному контуру.

Существенным отличием от рассматриваемых в этой статье разработок является то, что авторы указанной идеи исследовали влияние не трения, а степени деформации на формообразование поковки. Казалось бы, при таком подходе нормальная схема не может использоваться, так как непонятно, что считать начальным моментом деформирования и когда он заканчивается. Однако оказалось, что именно нормальная схема дает возможность пусть и с погрешностью, но быстро оценить (сделать экспресс-анализ) картину течения металла, что бывает немаловажно в производственных условиях, когда в отдельных случаях можно пожертвовать точностью расчетов ради скорости принятия решений. Следует также отметить, что нормальная схема течения металла сравнительно легко поддается формализации и дает возможность получить несложный алгоритм построения картины течения металла и реализовать его в виде программного комплекса, позволяющего моделировать формообразование заготовки.

Компьютерное моделирование с помощью разработанного программного комплекса

Для визуализации реальной кинематической схемы течения металла, как обычно в подобных случаях, желательно провести натурные эксперименты. Упомянутые выше эксперименты не позволяют выявить поле скоростей или перемещений, а значит, и картину течения металла по всей площади контакта заготовки. Задача визуализации картины течения металла с помощью физического моделирования представляется весьма сложной. Если взять во внимание неизбежные временные и финансовые затраты на подготовку и проведение эксперимента, то задача и вовсе становится малопривлекательной. Наиболее продуктивный выход из данной ситуации – замена натурального эксперимента виртуальным, что в современных условиях высокоразвитой базы компьютерной техники и программного обеспечения весьма продуктивно. Компьютерное моделирование уже давно

является эффективным и высокотехнологичным способом моделирования, объединяющим численные и графические методы построений.

Прежде чем перейти к описанию разработанного авторами программного комплекса, имеет смысл дать небольшую классификацию способов моделирования. Все способы компьютерного моделирования можно условно разделить на две категории: способы моделирования процессов и способы моделирования объектов. К способам моделирования процессов можно отнести CAM/CAE и другие вычислительные системы, позволяющие моделировать процесс в конкретной предметной области, которые называют прикладными. В области обработки металлов давлением к ним относятся DEFORM, FORGE, ANSYS, SPLEN и др. К способам моделирования объектов относятся CAD-системы, позволяющие моделировать геометрические объекты (от примитивов до сложных криволинейных поверхностей). Кроме этого, такие системы дают возможность проектировать сложные машины и механизмы и готовить для них конструкторскую документацию. Примерами указанных CAD-систем являются COMPAS, AutoCAD, SolidWorks, Unigraphics.

Сочетанием способов моделирования указанных двух категорий может служить разработанный авторами программный комплекс EQUI (рис. 2), реализованный в среде визуального программирования DELPHI, базирующийся на нормальной кинематической схеме течения металла.

Программный комплекс EQUI [5-7], предназначенный для моделирования картины течения металла и пространственной эпюры контактных напряжений в процессах осадки, которая сопутствует течению металла по зеркалу гравюры штампа при объемной штамповке поковок из плоских заготовок, состоит из трех основных

программных блоков, обеспечивающих решение статической, кинематической и динамической задач. Решение статической задачи хорошо согласуется с принципом кратчайшей нормали, в соответствии с которым металл по плоскости контакта течет вдоль линий тока, направленных ортогонально контуру поковки. В этом случае линия раздела течения металла является геометрическим местом точек, равноудаленных от контура заготовки, или эквидистантой. Решение кинематической задачи базируется на принципе наименьшего периметра, благодаря которому может быть принята псевдонормальная схема течения металла, характеризующаяся тем, что линии тока направлены ортогонально к некоторой условной кривой, являющейся линией уровня на поверхности контактных напряжений. Тогда металл течет вдоль радиусов некоторой окружности, называемой условным контуром.

Динамическая задача сводится к построению пространственной эпюры контактных напряжений, которая представляет собой сочетание конических и гранных поверхностей. Причем в проекции на плоскость контакта ребра этой поверхности являются линиями раздела течения металла, а линии ската – линиями тока.

В программном комплексе EQUI, который относится к способам моделирования процессов и объектов, в отличие от предыдущих версий, предусмотрена в том числе возможность построения пространственной эпюры контактных напряжений на основе плоской картины течения металла. То есть решена достаточно сложная в плане формализации задача построения пространственной эпюры контактных напряжений за счет «вспухания» картины течения металла, расположенной на плоскости контакта, до объемной фигуры (см. рис. 2).

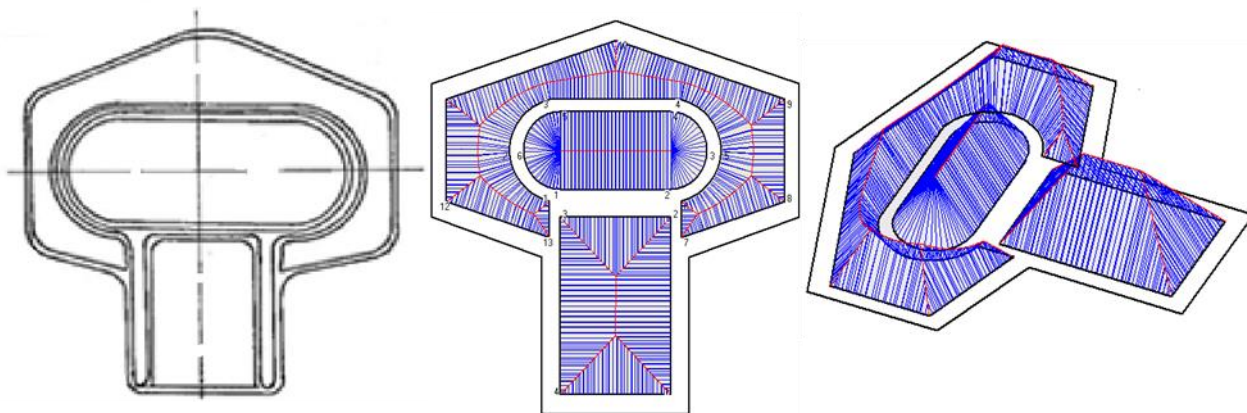


Рис. 2. Чертеж детали и результаты моделирования в программном комплексе EQUI

Fig. 2. Drawing of the part and simulation results in EQUI software suite

Моделирование эпюры контактных давлений с помощью КОМПАСа

В отдельных случаях моделирование нормальной кинематической схемы течения металла, а вместе с ней и пространственной эпюры контактных напряжений возможно одним из способов моделирования объектов. Самый простой из них, но достаточно наглядный, – отечественный программный продукт КОМПАС. Надо отметить, что кажущаяся простота этого графического пакета объясняется следующим: во-первых, один из приемов получения твердотельных моделей в КОМПАСе является «выдавливание», которое представляет собой построение поверхности одинакового ската (а именно ее и представляет собой пространственная эпюра контактных напряжений) на заданном контуре; во-вторых, простота с точки зрения пользователя реализации рассматриваемых построений в КОМПАСе достигнута за счет высокой квалификации разработчиков, что также характерно для разработчиков EQUI.

Для моделирования пространственной эпюры контактных давлений и линии раздела течения металла программный продукт КОМПАС достаточно удобен тем, что, во-первых, он прост в освоении; во-вторых, выдавливание твердотельной модели на плоском контуре происходит так, что все образующие получаемой поверхности наклонены под одним углом к плоскости контура. Следовательно, твердотельная модель – это поверхность одинакового ската, аналогичная

по форме пространственной эпюры контактных давлений. На плоском чертеже проекция этой модели на плоскость контакта отображает линию раздела течения металла.

С минимальными временными и трудозатратами в КОМПАСе можно получить решение задачи построения твердотельной модели для двух- и трехсвязного контура, чему соответствует визуализация пространственной эпюры контактных напряжений при осадке круглой пластины с круглым вырезом и прямоугольной пластины с двумя круглыми вырезами (рис. 3).

Наглядное изображение пространственной эпюры контактных напряжений позволяет оперативно выбирать потребные усилия прессы для сложоконтурных поковок. Очевидно, что для деформирования пластины с вырезом требуется гораздо меньше усилий, чем для сплошной пластины. Сравнение результатов моделирования в КОМПАСе и EQUI дает хорошее совпадение.

Однако даже для самых простых односвязных контуров не всегда удастся в КОМПАСе построить твердотельную модель полностью, так как в большинстве случаев невозможно «вытянуть» (выдавить) до самого верха такую поверхность. Возможности твердотельного моделирования поверхностей в SolidWorks гораздо шире, но и эта компьютерная система не всегда позволяет получить решение. Более совершенные и сложные CAD-системы дают дополнительные возможности в этом плане.

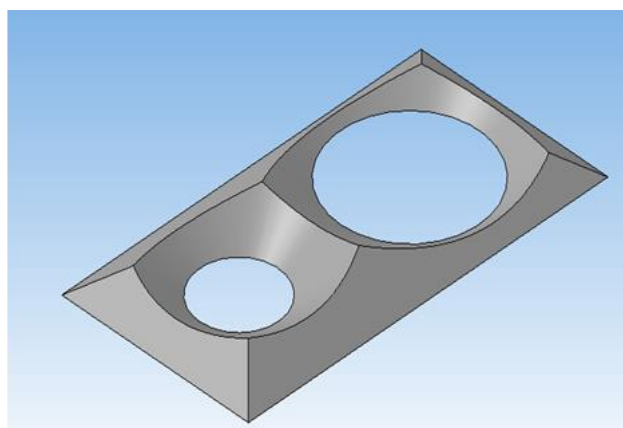
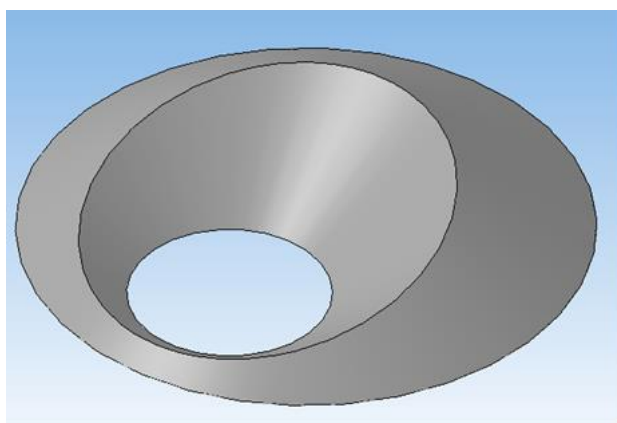


Рис. 3. Результаты моделирования в КОМПАСе
Fig. 3. Simulation results in KOMPAS

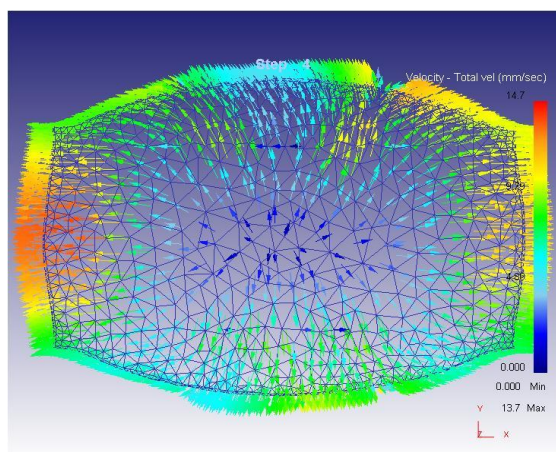
Виртуальный эксперимент по осадке пластин

Для проведения виртуальных экспериментов применялся программный комплекс DEFORM, позволяющий моделировать все основные процессы, применяемые в обработке металлов давлением (ковка, штамповка, прокатка, прессование и др.).

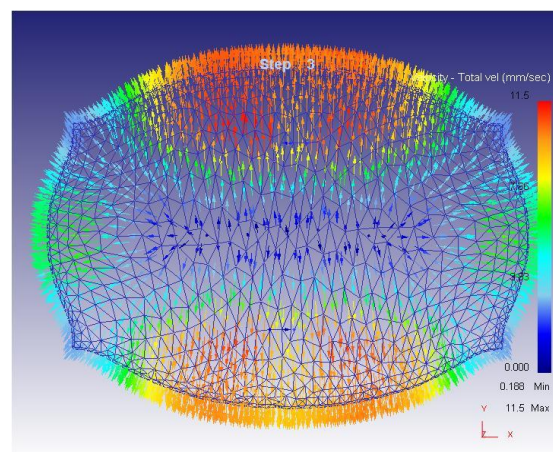
Для исследования влияния коэффициента трения на кинематическую схему течения металла проведены виртуальные эксперименты по осадке прямоугольной в плане пластины с различным соотношением размеров сторон и толщины из сплава Aluminium 3003 (аналог сплава АМц). Использовалась заготовка с размерами в плане 100×50 мм, толщиной 5 мм, при температуре разогрева заготовки 380°C и штампа 420°C, с учётом теплообмена со средой. Эксперимент по осадке проводился в условиях, максимально приближенных к реальным.

В результате получены поля скоростей перемещения частиц металла в плоскости контакта деформируемого образца и инструмента, которые позволяют визуализировать кинематическую схему течения металла (рис. 4). Для корректности сравнения результатов компьютерного моделирования при различных коэффициентах трения поля скоростей перемещения частиц показаны при одинаковой степени деформации, а именно 40%.

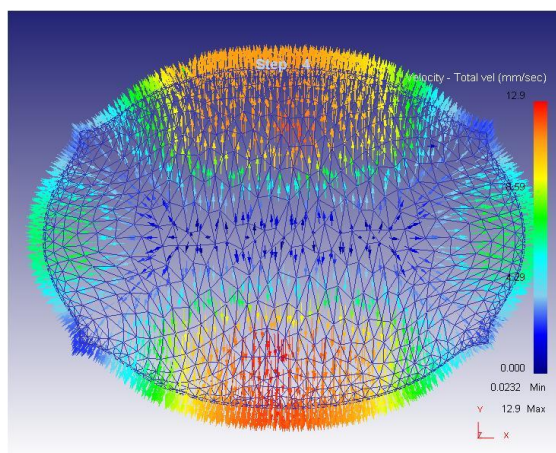
Результаты виртуального эксперимента позволяют сделать вывод, что при коэффициенте трения, близком к минимальному, кинематическую схему течения металла можно считать радиальной; при коэффициенте трения, близком к максимальному, кинематическая схема течения металла близка к нормальной (сравните с рис. 1); при трении, близком к промышленным условиям, наблюдается некоторая «промежуточная» кинематическая схема течения металла.



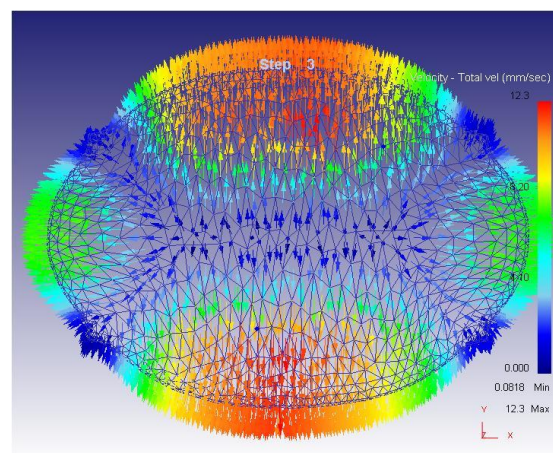
а



б



в



г

Рис. 4. Картина течения металла, полученная в DEFORM, для коэффициентов трения:

а – $k = 0,09$; б – $k = 0,4$; в – $k = 0,8$; г – $k = 0,99$

Fig. 4. Metal flow chart simulated in DEFORM for friction coefficients:

a is $k = 0,09$; б is $k = 0,4$; в is $k = 0,8$; г is $k = 0,99$

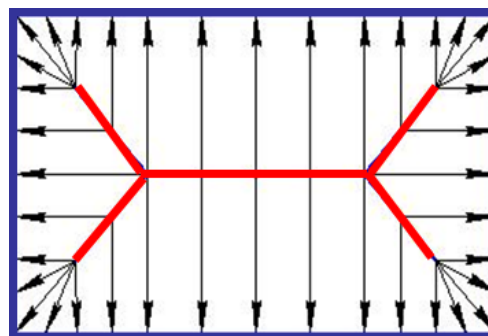
Также проводились исследования, как кинематическая схема течения металла зависит от ряда других факторов. Для определения зависимости кинематической схемы течения металла от вида металла произведена осадка образцов из сплавов АМц, Ст 35 и идеально пластичного материала. Оказалось, что для разных сплавов кинематическая схема течения металла выглядит приблизительно одинаково.

В ходе виртуальных экспериментов, выполненных с помощью программного комплекса DEFORM, выяснилось, что с увеличением толщины заготовки кинематическая схема течения металла стремится к радиальной независимо от показателя трения. Для толстых заготовок скорость течения металла значительно снижается по сравнению с тонкими заготовками. Для тонких заготовок показатель трения является подавляющим фактором при выборе кинематической схемы течения металла.

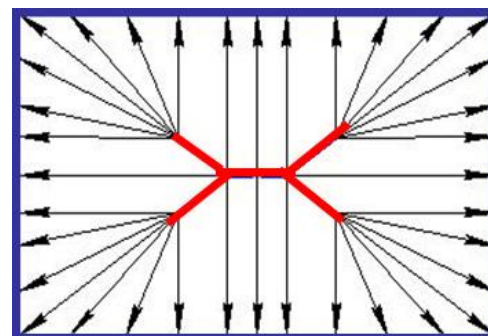
Температурно-скоростные режимы деформации металлических материалов в зависимости от их структуры и реологического состояния показывают, что такие сплавы можно отнести к средне- и мелкозернистым, что соответствует большинству конструкционных сплавов, применяемых в промышленности дляковки и штамповки. Важно отметить, что реологические свойства таких металлов отличаются в незначительной мере друг от друга ввиду равных возможностей межзеренного скольжения. Для таких металлов скольжение между зернами составляет приблизительно 5% от всей деформации. В основном деформирование происходит за счет изменения формы зерен. Следовательно, такие металлы можно считать в значительной мере пластическими.

Анализ результатов компьютерного моделирования

По результатам компьютерного моделирования (виртуального эксперимента) можно предположить, что при любых параметрах процесса осадки реальной является «промежуточная» кинематическая схема течения металла (рис. 5), которая состоит из зон течения по нормали к контуру и зон радиального течения. При этом можно предполагать, в том числе и на основании результатов виртуального эксперимента, что чем меньше коэффициент (показатель) трения, тем короче линии раздела течения металла, меньше их «разветвленность», и тем длиннее линии тока, а следовательно, кинематическая схема течения металла ближе к радиальной. Чем больше коэффициент (показатель) трения, тем кинематическая схема течения металла ближе к нормальной.



а



б

Рис. 5. «Псевдонормальная» схема течения металла:
а – при трении, близком к максимальному;
б – при трении, близком к минимальному

Fig. 5. Pseudonormal metal flow diagram:
a is when friction is close to a maximum value;
b is when friction is close to a minimum value

Тогда можно утверждать, что различные вариации промежуточной кинематической схемы течения металла служат некоторой масштабной моделью закона наименьшего сопротивления, при котором радиальная и нормальная схемы являются ее предельными случаями.

Поскольку остается ряд недостаточно изученных областей, требующих внимательного рассмотрения в плане влияния на результаты вышеописанных исследований, следует учесть разработки, касающиеся макроструктурных изменений в процессах пластической деформации и смежных проблем в металлургической сфере [8-18].

Заключение

1. В результате оценки предельных кинематических схем течения металла можно утверждать, что для описания течения металла в реальных условиях наиболее обоснованной является «промежуточная» кинематическая схема течения металла, основой для которой служит «псевдонормальная» схема течения металла, в то время как радиальная и нормальная схемы могут считаться ее предельными случаями.

2. На основании виртуального эксперимента получено подтверждение обоснованности использования псевдонормальной схемы течения металла для описания течения металла по плоскости заготовки в процессах осадки.

3. Продемонстрированы возможности разработанного программного комплекса, позволяющего моделировать картину течения металла в процессах осадки.

Список источников

1. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. М.: Машиностроение, 1977. 423 с.
2. Sobbe C. Beiträge zur Technologie des Schmiedepressens. Werkstattstechnik, 1908, no. 9, pp. 457-471.
3. Тарновский И.Я., Поздеев А.А., Ганаго О.А. Деформации и усилия при обработке металлов давлением. М.: Машгиз, 1959. 304 с.
4. Соломонов К.Н., Костарев И.В., Абашкин В.П. Моделирование процессов объемной штамповки иковки плоских заготовок. М.: Издательский дом МИСиС, 2008. 128 с.
5. Solomonov K. Development of software for simulation of forming forgings. Procedia Engineering, 2014, no. 81, pp. 437-443.
6. Solomonov K., Tishchuk L., Fedorinin N. Simulation of forming a flat forging. Journal of Physics: Conf. Series, 2017, vol. 918, 012038.
7. Solomonov K.N., Tishchuk L.I., Lezhnev S.N., Listrov E.A. Simulation of upsetting process using kinematic schemes of metal flow. Journal of Materials Science and Engineering, 2020, vol. 971, 022041.
8. Gorbatyuk S.M., Morozova I.G., Naumova M.G. Color mark formation on a metal surface by a highly concentrated energy source. Metallurgist, 2016, vol. 60, no. 5-6, pp. 646-650.
9. Zakharov A.N., Gorbatyuk S.M., Borisevich V.G. Modernizing a press for making refractories. Metallurgist, 2008, vol. 52, no. 7-8, pp. 420-423.
10. Bast J., Gorbatyuk S.M., Kryukov I.Yu. Study of the temperature fields in the mold of a horizontal continuous caster. Metallurgist, 2011, vol. 55, no. 3-4, pp. 163-166.
11. Glukhov L.M., Gorbatyuk S.M., Morozova I.G. Effective laser technology for making metal products and tools. Metallurgist, 2016, vol. 60, no. 3-4, pp. 306-312.
12. Tarasov Yu.S., Radyuk A.G., Gorbatyuk S.M. Effect of the thermal insulation of the inner wall on the thermal condition of the air tuyeres of blast furnaces. Metallurgist, 2018, vol. 61, no. 9-10, pp. 745-750.
13. Gorbatyuk S.M., Morozova I.G., Naumova M.G. Development of the working model of production reindustrialization of die steel heat treatment. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [News of Universities. Ferrous Metallurgy], 2017, vol. 60, no. 5, pp. 410-415.
14. Artiukh V.G., Karlushin S.Yu., Sorochan E.N. Peculiarities of mechanical characteristics of contemporary polyurethane elastomers. Procedia Engineering, 2015, no. 117, pp. 938-944.
15. Artiukh V., Raimberdiyev T., Mazur V. Use of CAE-systems at evaluation of shock absorbers for metallurgical equipment. MATEC Web of Conferences, 2016, vol. 53, 01039.
16. Polyakov A.V., Mazur I.P. Research on the Effect of Reduction Distribution in Universal Stands on the Process of Metal Transition from Sides to the Center Line of Transfer Bar // Materials Science and Engineering: Conf. Series, 2019, vol. 718, 012014.
17. Мазур И.П., Ситников В.О., Шопин И.И. Повышение востребованности специалистов-металлургов для бизнеса: совершенствование образовательной программы // Черные металлы. 2020. № 8. С. 34-39.
18. Мазур И.П., Бобков Е.Б., Соловьев В.Н. Технология и производство листового проката. Взгляд на устремления и тенденции // Черные металлы. 2021. № 10. С. 4-12.

References

1. Storozhev M.V., Popov E.A. *Teoriya obrabotki metallov davleniem* [Theory of metal forming]. Moscow: Mashinostroenie, 1977, 423 p. (In Russ.)
2. Sobbe C. Beiträge zur Technologie des Schmiedepressens. Werkstattstechnik, 1908, no. 9, pp. 457-471.
3. Tarnovsky I.Ya., Pozdeev A.A., Ganago O.A. *Deformatsii i usiliya pri obrabotke metallov davleniem* [Strain and stress in metal forming]. Moscow: Mashgiz, 1959, 304 p. (In Russ.)
4. Solomonov K.N., Kostarev I.V., Abashkin V.P. *Modelirovanie protsessov obemnoi shtampovki i kovki ploskikh zagotovok* [Simulation of hot die forging and pressing of flat bars]. Moscow: Publishing House of Moscow Institute of Steel and Alloys, 2008, 128 p. (In Russ.)
5. Solomonov K. Development of software for simulation of forming forgings. Procedia Engineering, 2014, 81, 437-443.
6. Solomonov K., Tishchuk L., Fedorinin N. Simulation of forming a flat forging. Journal of Physics: Conf. Series, 2017, 918, 012038.
7. Solomonov K.N., Tishchuk L.I., Lezhnev S.N., Listrov E.A. Simulation of upsetting process using kinematic schemes of metal flow. Journal of Materials Science and Engineering, 2020, 971, 022041.
8. Gorbatyuk S.M., Morozova I.G., Naumova M.G. Color mark formation on a metal surface by a highly concentrated energy source. Metallurgist, 2016, 60(5-6), 646-650.
9. Zakharov A.N., Gorbatyuk S.M., Borisevich V.G. Modernizing a press for making refractories. Metallurgist, 2008, 52(7-8), 420-423.
10. Bast J., Gorbatyuk S.M., Kryukov I.Yu. Study of the temperature fields in the mold of a horizontal continuous caster. Metallurgist, 2011, 55(3-4), 163-166.
11. Glukhov L.M., Gorbatyuk S.M., Morozova I.G. Effective laser technology for making metal products and tools. Metallurgist, 2016, 60(3-4), 306-312.

12. Tarasov Yu.S., Radyuk A.G., Gorbatyuk S.M. Effect of the thermal insulation of the inner wall on the thermal condition of the air tuyeres of blast furnaces. *Metallurgist*, 2018, 61 (9-10), 745-750.
13. Gorbatyuk S.M., Morozova I.G., Naumova M.G. Development of the working model of production reindustrialization of die steel heat treatment. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [News of Universities. Ferrous Metallurgy], 2017, vol. 60, no. 5, pp. 410-415. (In Russ.)
14. Artiukh V.G., Karlushin S.Yu., Sorochan E.N. Peculiarities of mechanical characteristics of contemporary polyurethane elastomers. *Procedia Engineering*, 2015, 117, 938-944.
15. Artiukh V., Raimberdiyev T., Mazur V. Use of CAE-systems at evaluation of shock absorbers for metallurgical equipment. *MATEC Web of Conferences*, 2016, 53, 01039.
16. Polyakov A.V., Mazur I.P. Research on the effect of reduction distribution in universal stands on the process of metal transition from sides to the center line of transfer bar. *Materials Science and Engineering: Conf. Series*, 2019, 718, 012014.
17. Mazur I.P., Sitnikov V.O., Shopin I.I. Increasing a demand for specialists in metallurgy for business: improving the educational program. *Chernye metally* [Ferrous Metals], 2020, no. 8, pp. 34-39. (In Russ.)
18. Mazur I.P., Bobkov E.B., Solovev V.N. Technology and production of flat products. Overview of intentions and trends. *Chernye metally* [Ferrous Metals], 2021, no. 10, pp. 4-12. (In Russ.)

Поступила 18.10.2022; принята к публикации 12.12.2022; опубликована 22.12.2022
Submitted 18/10/2022; revised 12/12/2022; published 22/12/2022

Соломонов Константин Николаевич – доктор технических наук, профессор, филиал Ростовского государственного университета путей сообщения, Воронеж, Россия.
Email: konssol@list.ru.

Тищук Людмила Ивановна – кандидат технических наук, доцент, филиал Ростовского государственного университета путей сообщения, Воронеж, Россия.

Бахаев Константин Вячеславович – кандидат технических наук, доцент, Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия.
Email: bakhaev@stu.lipetsk.ru.

Konstantin N. Solomonov – DrSc (Eng.), Professor, Branch of Rostov State Transport University, Voronezh, Russia.
Email: konssol@list.ru.

Lyudmila I. Tishchuk – PhD (Eng.), Associate Professor, Branch of Rostov State Transport University, Voronezh, Russia.

Konstantin V. Bakhaev – PhD (Eng.), Associate Professor, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia.
Email: bakhaev@stu.lipetsk.ru.

ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ MATERIAL PROCESS ENGINEERING

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

УДК 621.793

DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-4-67-82



ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЯ МЕДЬ-КАРБИД КРЕМНИЯ

Серебряков И.С.¹, Латфулина Ю.С.², Напримерова Е.Д.², Мясоедов В.А.², Самодурова М.Н.²

¹ SARDOU SA, Сен-Суппле, Франция

² Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск, Россия

Аннотация. Идея композиционных материалов с металлической матрицей была реализована для облегчения нанесения хрупких материалов. Композиционные материалы представляют собой материал с по меньшей мере двумя составными частями, одна из которых представляет собой металл, а другая – другой металл или материал. Технологии производства композиционных материалов можно разделить на три типа: твердотельное, жидкое и паровое. В последние годы холодное газодинамическое напыление (ХГН) стало одним из мощных производственных процессов для получения композиционных покрытий. Смешивание различных порошков и распыление их на подложке является широко применяемым методом. Из-за низкой температуры осаждения во время ХГН нет существенных реакций при распылении смесей композиционных порошковых материалов. Существуют и другие преимущества, такие как более низкое содержание кислорода и более высокая плотность полученного покрытия. Эти преимущества помогают уменьшить усадку при любой последующей термообработке. В случае применения двух металлов, образующих композиционный материал, термообработка после осаждения может привести к образованию интерметаллических соединений в контролируемой среде. В случае комбинации металла с твердыми частицами металл действует как матрица, позволяющая внедрять твердые частицы и в результате получать высокоплотные и функциональные покрытия. Композиционные покрытия могут осаждаться ХГН тремя различными способами: осаждение порошковых смесей, осаждение композиционных порошков, полученных агломерацией или механическим измельчением, и нанесение порошков с оболочкой или покрытием. Данное исследование сфокусировано на получении композиционного покрытия на основе меди методом ХГН. Медные покрытия используются в контейнерах для хранения опасных материалов из-за их хорошей коррозионной стойкости. Целями данных исследований являлось определение возможности нанесения медно-керамических покрытий на стальную подложку и оптимальное количество керамики в смеси, исследование свойств полученных покрытий, такие как твердость, содержание керамики, а также микроструктура покрытий.

Ключевые слова: холодное газодинамическое напыление, медь, карбид кремния, функциональные покрытия, сталь

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант № FENU-2020-0020).

© Серебряков И.С., Латфулина Ю.С., Напримерова Е.Д., Мясоедов В.А., Самодурова М.Н., 2022

Для цитирования

Исследование механических и технологических свойств покрытия медь-карбид кремния / Серебряков И.С., Латфулина Ю.С., Напримерова Е.Д., Мясоедов В.А., Самодурова М.Н. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №4. С. 67-82. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-67-82>



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

STUDY OF MECHANICAL AND TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF COPPER-SILICON CARBIDE COATINGS

Serebriakov I.S.¹, Latfulina Yu.S.², Naprimerova E.D.², Myasoedov V.A.², Samodurova M.N.²

¹ SARDOU SA, Saint-Soupplets, France

² South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia

Abstract. The idea of metal matrix composites has been implemented to facilitate the application of brittle materials. Composite materials are materials with at least two constituent parts, one of which is metal and the other one is a different metal or another material. Composite manufacturing techniques can be divided into three types: solid state, liquid state, and vapor deposition. In recent years, gas dynamic cold spraying technology (CS) has become one of the powerful manufacturing processes for composite coatings. Blending various powders and spraying them onto a substrate is a widely used method. Because of the low deposition temperature during CS, there are no significant reactions when spraying mixtures of composite powders. There are other advantages, such as lower oxygen content and higher density of the resulting coating. These advantages help to reduce shrinkage in any subsequent heat treatment. In case of two metals forming a composite, post deposition heat treatment can result in the formation of intermetallic compounds in a controlled environment. In case of a combination of metal with hard particles, metal acts as a matrix allowing the introduction of the hard particles and resulting in high-density and functional coatings. Composite coatings can be deposited by CS in three different ways: deposition of powder mixtures, deposition of composite powders produced by agglomeration or mechanical milling, and deposition of coated powders. This study focuses on the production of copper-based composite coatings by cold spraying. Copper coatings are used in storage containers for hazardous materials because of their good corrosion resistance. The objectives of this research were to determine the possibility of applying copper-ceramic coatings on a steel substrate and the optimal amount of ceramics in the mixture, to study the properties of the obtained coatings, such as hardness, ceramic content, and a microstructure of the coatings.

Keywords: gas dynamic cold spraying, copper, silicon carbide, functional coatings, steel

The research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (grant No. FENU-2020-0020).

For citation

Serebriakov I.S., Latfulina Yu.S., Naprimerova E.D., Myasoedov V.A., Samodurova M.N. Study of Mechanical and Technological Properties of Copper-Silicon Carbide Coatings. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 4, pp. 67-82. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-67-82>

Введение

Холодное газодинамическое напыление (ХГН) в настоящий момент имеет широкое распространение на производствах, связанных с машиностроением, авиастроением, атомной промышленностью и т.д.

Целью данного исследования является получение оптимальных технологических условий для создания композиционных покрытий из меди и карбида кремния, а также достижение оптимальных механических свойств покрытия.

С 2000-х годов исследования в данной области ведутся многими научными группами мирового сообщества [1-11]. Большинство исследований в данной области направлено на применение медных покрытий для электротехнического [11-17] и ядерного [10, 18-21] производств. Для электротехнического назначения авторы статей опираются на классические методы нанесения

покрытий с повышенными эксплуатационными характеристиками [13].

Хорошие результаты показывают технологии нанесения меди на поверхности, которые, в свою очередь, подогреваются до определенной температуры [15]. Покрытия демонстрируют относительно низкие остаточные напряжения и низкую твердость, тогда как их электропроводность достигает высоких значений – более 90%.

Более интересным для наших исследований является область ядерного производства. В частности, одной из причин, по которой были проведены исследования в области создания толстых покрытий из меди, заключается в том, что рассмотрена возможность их применения в качестве антикоррозионных барьеров для стальных контейнеров, используемых в хранилищах для ядерных отходов. Способ ХГН обладает высокой скоростью нанесения покрытий и низким уровнем окисления.

Наиболее важными характеристиками конструкции контейнера для хранения использованного ядерного топлива являются коррозионная стойкость, механическая прочность, способность и совместимость с окружающими уплотнительными материалами, такими как бентонитовая глина [18-20]. Целью такой «медной оболочки» являются высокая коррозионная стойкость. В отличие от существующих конструкций эти покрытия тоньше (толщиной 4 мм) и состоят из интегрированного медного покрытия, а не толстостенной медной оболочки [18-19, 21].

Предварительные исследования [10] показали, что изготовление медных покрытий толщиной 4 мм на подложке из стали является непростой задачей, так как у них невысокая адгезионная стойкость [22], существует проблема отслоения нанесенного покрытия [23]. Существуют и другие методы решения данной проблемы [10], которые заключаются в нанесении исходного слоя меди на стальную подложку с использованием гелия в качестве технологического газа с последующим наращиванием покрытия до требуемой толщины с использованием азота [18-19, 24-26]. Этот двухэтапный подход привел к получению высококачественных толстых медных покрытий, так как использование гелия вместо азота резко увеличивает скорость и, следовательно, скорость удара частиц способствует тем самым более интенсивной деформации как частиц, так и подложек. Это в значительной мере увеличивает адгезионную стойкость покрытия.

Этот метод консолидации покрытий соответствует методу, предложенному Маевым Р.Г. и др. [27, 28], где гелий впервые был использован для создания адгезии между частицами меди и стальными подложками.

Из приведенных источников можно сделать предположение, что двухэтапный подход обеспечивает использование ХГН для получения покрытий с высокой адгезионной стойкостью, но использование гелия не является идеальным, поскольку он значительно дороже азота и может рассматриваться как чувствительный и невозобновляемый ресурс [10].

Часто исследователи сравнивают ХГН с другими технологиями нанесения покрытий, например с высокоскоростным газопламенным распылением [30]. Но этот метод считается неприменимым для создания «толстых» покрытий.

В статье [31] авторы сравнивают и показывают преимущество ХГН (для меди и её сплавов) перед высокоскоростным газопламенным, электродуговым и другими видами напыления.

Основным вопросом для многих исследователей в данной области является адгезионная стойкость покрытия [10, 32, 33]. Статья Фуканумы и др. [32] посвящена исследованиям влияния комбинации частиц и подложек, а также подающего давления на адгезионную стойкость. На **рис. 1** показана адгезионная стойкость меди на стальных, нержавеющей, алюминиевых и медных подложках.

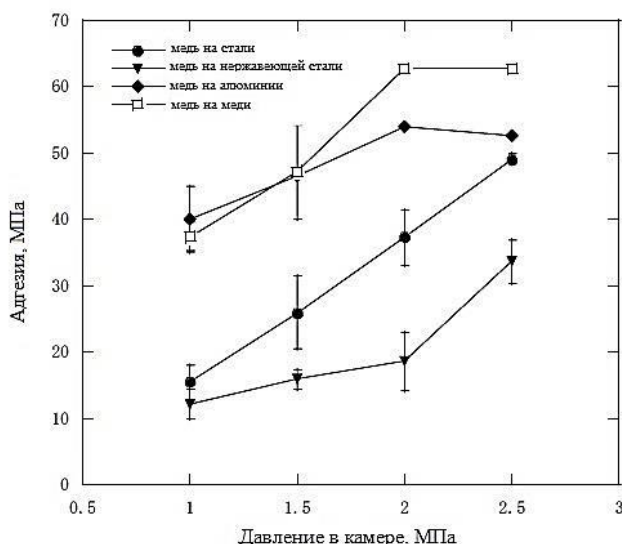


Рис. 1. Адгезия медных покрытий на стальных, нержавеющей, алюминиевых и медных подложках с применением гелия в качестве рабочего газа [32]

Fig. 1. Adhesion of copper coatings on steel, stainless steel, aluminum and copper substrates using helium as working gas [32]

По сравнению с предыдущим исследованием Фернандес и др. [10] сообщают, что толстые медные покрытия с высокой адгезионной стойкостью могут быть получены с использованием азота в качестве рабочего газа.

Другие экспериментальные результаты [33] показали, что хорошая адгезия между подложкой и покрытием может быть получена только при скорости частиц более 500 м/с для подложек из алюминиевых сплавов и 800 м/с для подложек из нержавеющей стали 316L (аналог 03X16H15M3).

Для более детального исследования этих вопросов большая часть авторов использовала в своих исследованиях численное моделирование и метод конечных элементов.

Фукумото и др. [34] использовали численное моделирование для конструирования нового специального сопла и объяснения более высокой эффективности нанесения покрытий, достигаемой с использованием вновь разработанного сопла. Исследование нанесения мелких частиц меди на основе численного расчета газа, текущего на плоской поверхности, было выполнено путем моделирования. Так же были исследованы параметры поверхности подложки и металлографических наблюдений за частицами меди в покрытии, в частности, с точки зрения влияния ударной силы на эффективность осаждения частиц.

Для лучшего понимания роли адгезии в механизме разрушения и прочности образцов, полученных с использованием импульсной гидроабразивной резки, был проведен анализ с использованием ABAQUS/Explicit [10] для моделирования и прогнозирования сцепления покрытия и подложкой. Результат моделирования подтверждает влияние точек крепления как основного фактора, влияющего на прочность адгезии. Было обнаружено, что в рамках модели остаточные напряжения незначительно влияют на адгезионную прочность покрытий. Моделирование также убедительно свидетельствует о том, что

единственный тип связи между покрытием и подложкой – механический.

В последнее время исследования в данной области показывают, что моделирование процесса ХГН для систем различных материалов достаточно актуально и требует дополнительных исследований [29, 35].

Проанализировав имеющиеся научные источники и выполнив библиографический поиск, авторами статьи были поставлены задачи и выполнены экспериментальные и теоретические исследования по нанесению толстых покрытий из меди методом ХГН.

Материалы, подготовка и исследование полученных образцов

В ходе эксперимента в качестве базы для исследуемой смеси использовался медный порошок компании Sandvik. Химический состав порошка показан в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав медного порошка, %
Table 1. Chemical composition of copper powder, %

Cu	Fe	Ni	Mn	P	Sn	Al	O
>99,95	–	–	–	–	–	–	<0,3

В качестве армирующей фазы использовались два порошка карбида кремния – F400 (17 мкм) и F1200 (3 мкм).

В качестве подложки использовалась нержавеющая сталь.

Шероховатость поверхности подложки имеет важное значение для получения покрытий с хорошей адгезией, в ходе экспериментов исследуемые образцы были подвергнуты пескоструйной обработке.

На рис. 2 представлены 3d-модели (изображение с измерительной машины ALICONA Infinite-FocusG5) поверхностей подложек, полученные при обработке абразивом разной фракции.

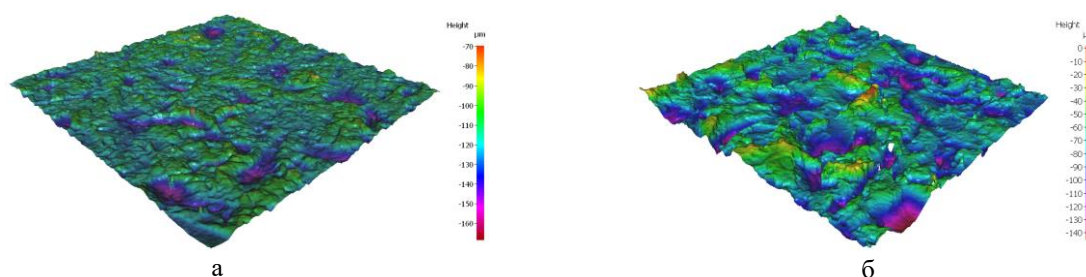


Рис. 2. 3d-поверхность подложки, обработанной мелким абразивом (а) и 3d-поверхность подложки, обработанной крупным абразивом (б)

Fig. 2. 3d surface of the substrate treated with fine abrasive (a) and 3d surface of the substrate treated with coarse abrasive (b)

В табл. 2 приведены значения шероховатости полученных образцов.

Таблица 2. Результаты измерения шероховатости поверхностей подложек

Table 2. Results of measuring roughness of the substrate surfaces

Номер образца	Ra , нм	Rz , нм
1	6,4585	40,2872
2	13,0836	67,1559

В результате работы была выполнена серия экспериментов с различными технологическими параметрами (температура, скорость и количество слоев покрытия) и было определено, что образцы, обработанные мелким абразивом, имеют низкую адгезию с подложкой, а крупным – имеют высокую адгезию (рис. 3).

Было отмечено, что смесь меди с карбидом кремния F1200 имеет низкую эффективность напыления по сравнению с карбидом кремния

F400 при одинаковых технологических параметрах процесса. Это можно объяснить эффектом агломерирования мелкого порошка (3 мкм) в ходе смешивания.

Было выявлено, что покрытие меди без добавления керамики имеет плохую адгезионную стойкость (рис. 4).

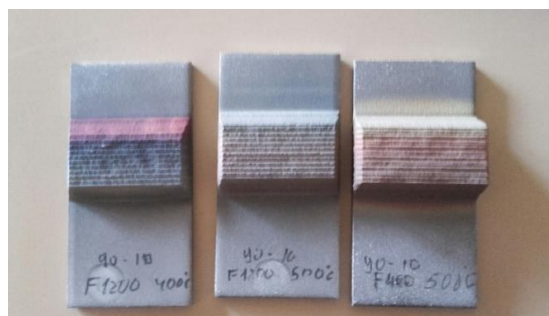
С целью определения механических свойств покрытий и их изотропности были проведены испытания на сжатие. Для минимизации трения и конечных эффектов во время испытаний все образцы покрывались тефлоновой пленкой.

Для испытаний на сжатие были взяты следующие образцы:

- Cu+SiC F400 70/30, напыленный при температуре 500°C;
- Cu+SiC F400 80/20, напыленный при температуре 500°C;
- Cu+SiC F400 90/10, напыленный при температуре 500°C.



а



б

Рис. 3. Покрытие с плохой адгезией к подложке (а) и покрытие на подложках, обработанных крупным абразивом (б)

Fig. 3. Coating with poor adhesion to the substrate (a) and coating on substrates treated with coarse abrasive (б)

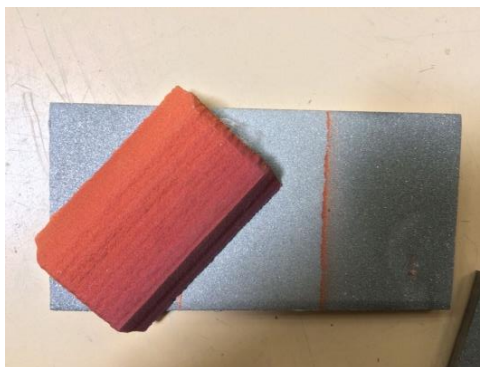


Рис. 4. Покрытие меди без керамики

Fig. 4. Coating copper without ceramic

Результаты экспериментов

На **рис. 5** представлен образец Cu+SiC F400 70/30 после испытания на сжатие и график перемещений для данного образца.

На **рис. 6, а** представлены результаты разрушения образцов Cu+SiC F400 80/20 и Cu+SiC F400 90/10 (поперечное направление) после испытания на сжатие, на **рис. 6, б** их графики перемещений.

На **рис. 7, а** можно видеть разрушенные образцы Cu+SiC F400 80/20 и Cu+SiC F400 90/10

(вертикальное направление) и графики перемещения после испытания на сжатие на **рис. 7, б**.

В ходе тестов все образцы, кроме образцов с 30% карбида кремния, были разрушены. Для построения графиков перемещения были введены корректирующие коэффициенты в виду того, что прибор записывает данные о перемещении пуансона пресса, а не образца (**рис. 8**).

$$U_{\text{specimen}} = U_{\text{tot}} - U_{\text{machine}}. \quad (1)$$

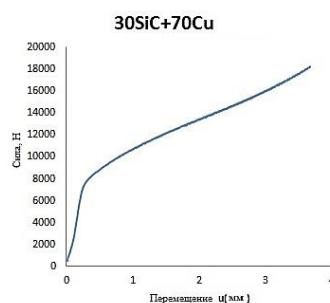
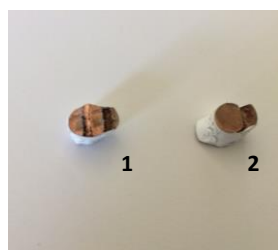
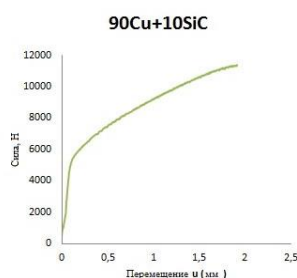


Рис. 5. Результаты испытания на сжатие образца Cu+SiC F400 70/30

Fig. 5. Compression test results of specimen Cu+SiC F400 70/30



а



б

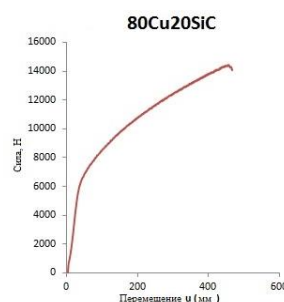
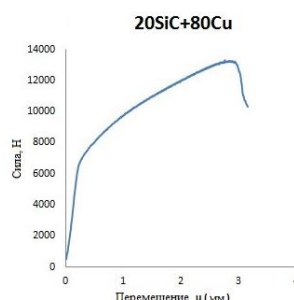


Рис. 6. Результаты разрушения образцов Cu+SiC F400 80/20 (1) и Cu+SiC F400 90/10 (2) (горизонтальное направление) (а); графики перемещений образцов Cu+SiC F400 80/20 и Cu+SiC F400 90/10, порезанных в горизонтальном направлении (б)

Fig. 6. Fracture tests of specimens Cu+SiC F400 80/20 (1) and Cu+SiC F400 90/10 (2) (a horizontal direction) (а); displacement diagrams of specimens Cu+SiC F400 80/20 and Cu+SiC F400 90/10 cut horizontally (б)



а



б

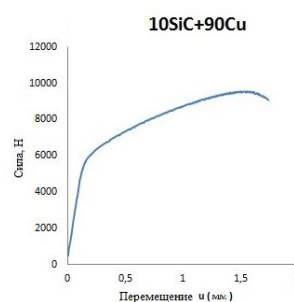


Рис. 7. Результаты разрушения образцов Cu+SiC F400 80/20 (1) и Cu+SiC F400 90/10 (2), порезанных в вертикальном направлении (а); графики перемещений образцов Cu+SiC F400 80/20 и Cu+SiC F400 90/10, порезанных в вертикальном направлении (б)

Fig. 7. Fracture tests of specimens Cu+SiC F400 80/20 (1) and Cu+SiC F400 90/10 (2) cut vertically (а); displacement diagrams of specimens Cu+SiC F400 80/20 and Cu+SiC F400 90/10 cut vertically (б)

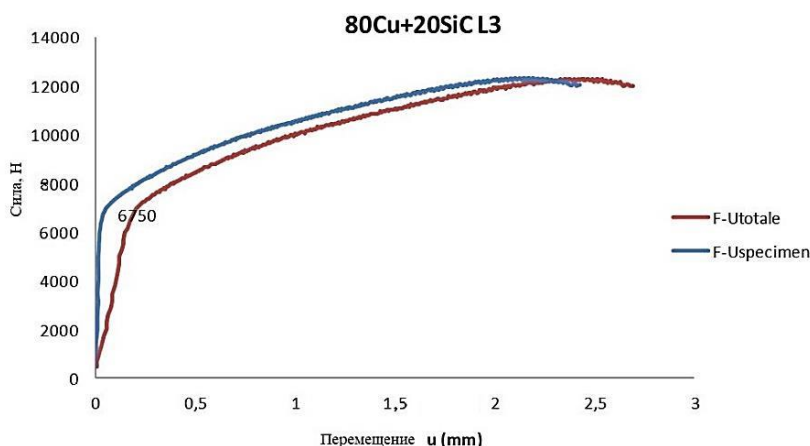


Рис. 8. Скорректированные графики перемещения
Fig. 8. Adjusted displacement diagrams

Интерпретация полученных результатов

Для построения графиков напряженно-деформированного состояния испытанных образцов были использованы следующие зависимости:

$$\varepsilon = \ln \left(\frac{h_0}{h_0 - u} \right), \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{F}{S}, \quad (3)$$

где h_0 – начальная высота образца; u – перемещение образца в данный момент времени; F – сила, приложенная в данный момент времени; S – площадь поперечного сечения образца в данный момент времени.

$$S = S_0 \left(\frac{h_0}{h_0 - u} \right). \quad (4)$$

На рис. 9 и 10 показаны графики напряжения-деформации для трех образцов Cu+SiC F400 90/10, порезанных в вертикальном направлении, и образцов Cu+SiC F400 90/10, порезанных в горизонтальном (поперечном) направлении, соответственно.

График Т1 на рис. 9 показывает, что в образце имеется дефект и при построении усредненного значения графика напряжения-деформации этот график учитываться не будет.

На основе данных графиков были построены средние графики напряжения-деформации для данных образцов (рис. 11), которые показывают, что механические свойства покрытия изотропны во всех направлениях.

Та же самая процедура была выполнена для образцов Cu+SiC F400 80/20.

На рис. 12 представлены графики усредненных значений напряженно-деформированного состояния образцов, разрезанных в поперечных направлениях.

На рис. 13 представлены средние графики для образцов Cu+SiC F400 80/20.

Для образцов Cu+SiC F400 70/30, разрезанных в горизонтальном направлении, также были построены графики напряжения-деформации (рис. 14).

Построение среднего графика для данных образцов не требуется в виду того, что синий и зеленый графики показывают неверные результаты из-за большого трения в ходе теста. В результате после построения всех графиков они были сведены в общую диаграмму, из которой видно, что лучшими механическими свойствами обладает покрытие с 30% керамики (рис. 15).

Далее для получения полной картины о механических свойствах покрытий графическим способом определяется предел текучести каждого типа покрытий.

На рис. 16 показан пример определения предела текучести для образцов Cu+SiC F400 70/30.

Та же самая процедура была проведена для остальных образцов. В итоге были получены следующие значения предела пластичности:

- Cu+SiC F400 70/30 – 0,2% $\sigma_0 = 275$ МПа;
- Cu+SiC F400 80/20 – 245 МПа < 0,2% σ_0 < 250 МПа;
- Cu+SiC F400 90/10 – 195 МПа < 0,2% σ_0 < 215 МПа.

Данные вычисления также подтверждают превосходство покрытий с 30% керамики.

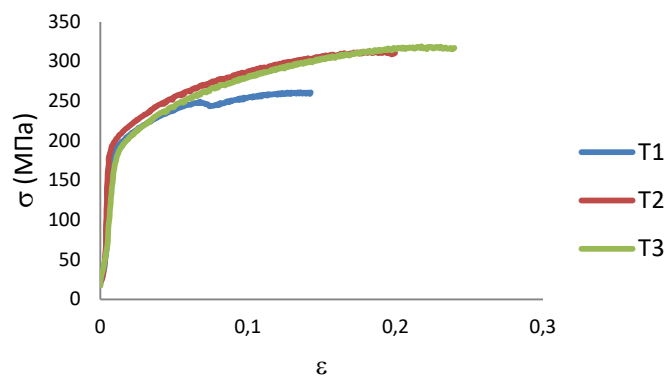


Рис. 9. Графики напряжения-деформации образцов Cu+SiC F400 90/10, порезанных в вертикальном направлении
Fig. 9. Stress-strain diagrams of specimens Cu+SiC F400 90/10 cut vertically

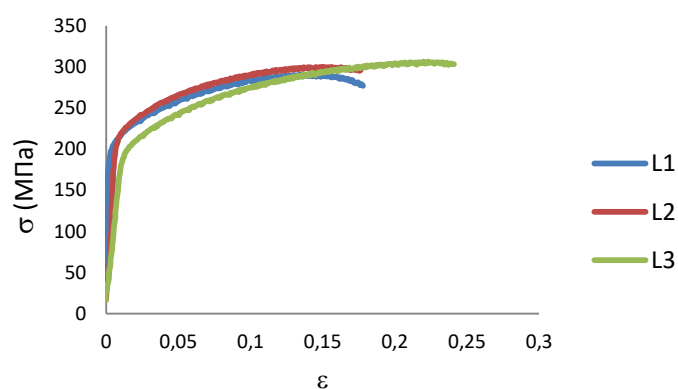


Рис. 10. Графики напряжения-деформации образцов Cu+SiC F400 90/10, порезанных в горизонтальном направлении
Fig. 10. Stress-strain diagrams of specimens Cu+SiC F400 90/10 cut horizontally

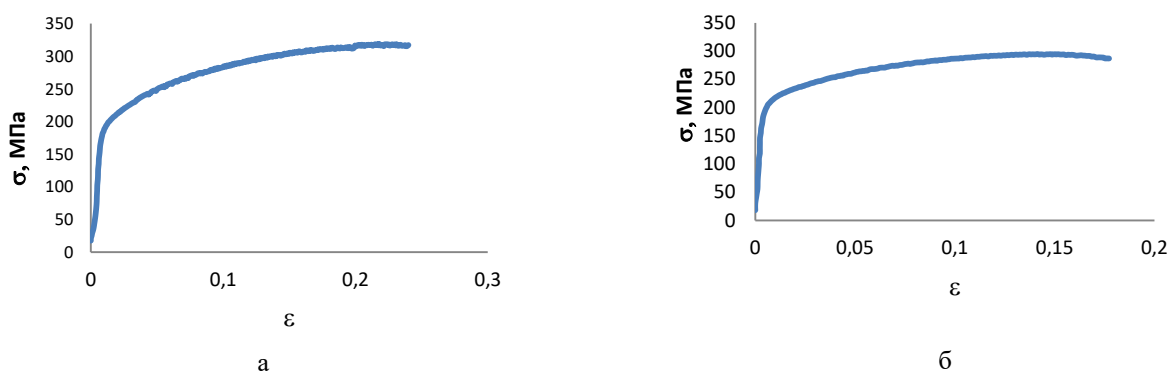


Рис. 11. Средний график напряжения-деформации образцов Cu+SiC F400 90/10, порезанных в вертикальном направлении (а) и в горизонтальном направлении (б)
Fig. 11. Average stress-strain diagram of specimens Cu+SiC F400 90/10 cut vertically (a) and cut horizontally (б)

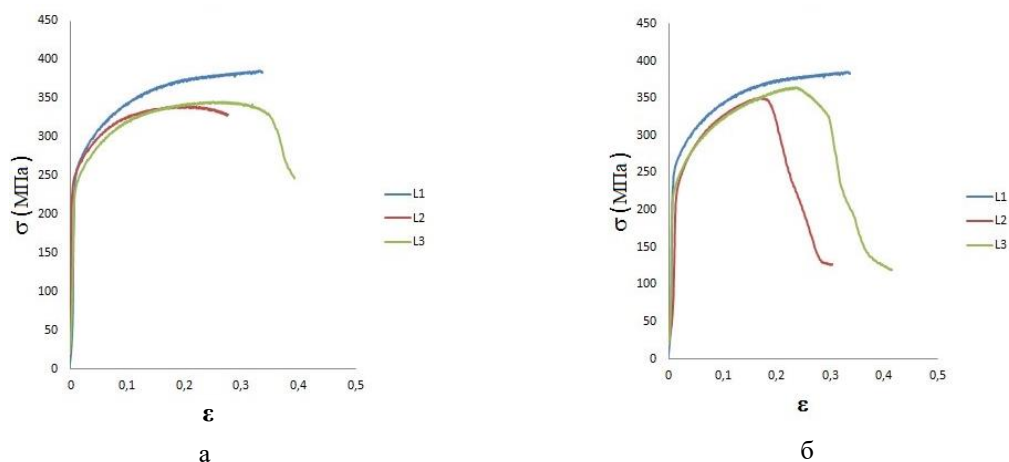


Рис. 12. Графики напряжения-деформации образцов Cu+SiC F400 80/20, разрезанных в поперечном направлении (а) и в вертикальном направлении (б)

Fig. 12. Stress-strain diagrams of specimens Cu+SiC F400 80/20 cut in a transverse direction (a) and cut vertically (б)

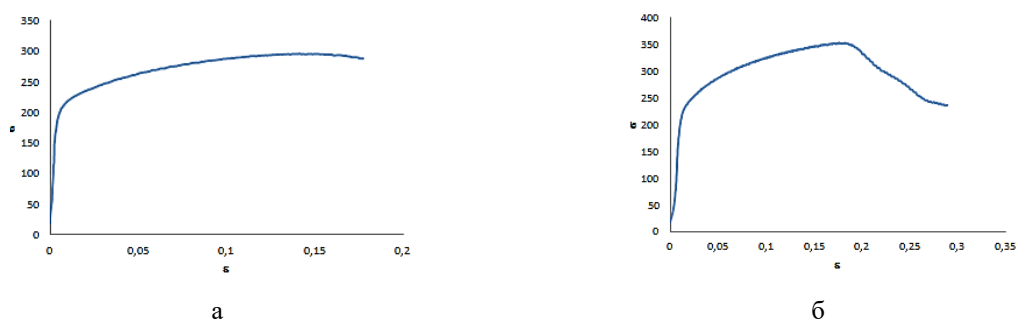


Рис. 13. Средний график напряжения-деформации образцов Cu+SiC F400 80/20, разрезанных в горизонтальном направлении (а) и в вертикальном направлении (б)

Fig. 13. Average stress-strain diagram of specimens Cu+SiC F400 80/20 cut horizontally (a) and cut vertically (б)

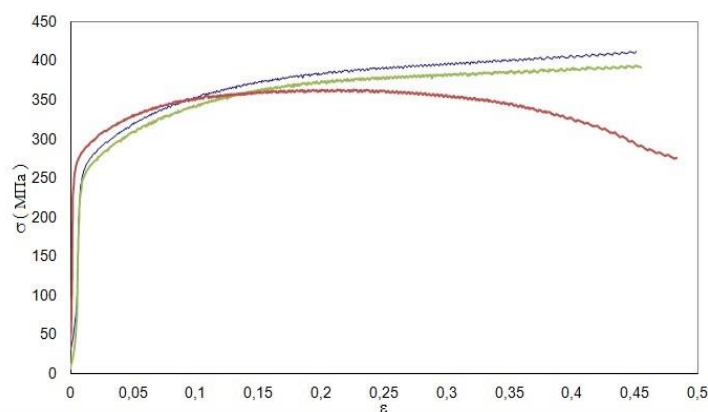


Рис. 14. Графики напряжения-деформации образцов Cu+SiC F400 70/30, разрезанных в горизонтальном направлении

Fig. 14. Stress-strain diagrams of specimens Cu+SiC F400 70/30 cut horizontally

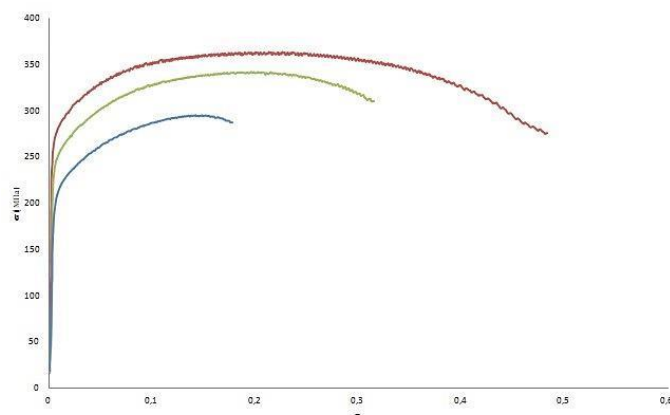
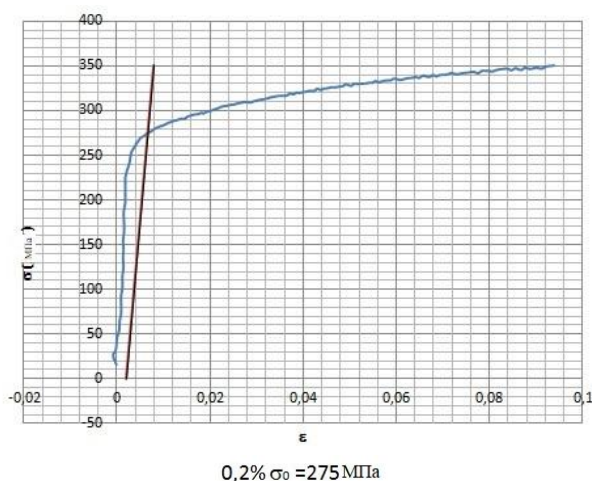


Рис. 15. Графики напряжения-деформации образцов Cu+SiC F400 70/30 (красный), Cu+SiC F400 80/20 (зеленый), Cu+SiC F400 90/10 (синий)

Fig. 15. Stress-strain diagrams of specimens Cu+SiC F400 70/30 (red), Cu+SiC F400 80/20 (green), Cu+SiC F400 90/10 (blue)



0,2% σ_0 = 275 МПа

Рис. 16. Пример определения предела текучести для образцов Cu+SiC F400 70/30

Fig. 16. Yield strength determination for specimens Cu+SiC F400 70/30 for reference

Микроструктура покрытий

Для изучения микроструктуры покрытий использовали сканирующий электронный микроскоп. В результате было выявлено, что частицы карбида кремния равномерно распределены в покрытии (рис. 17).

Прежде всего, данные фото позволили рассчитать процентное содержание карбида кремния в объеме покрытия. Результаты этих расчетов сведены в табл. 3.

Кроме того, полученные фото позволяют объяснить причину разрушения образцов при испытании на сжатие. На рис. 18 в образце Cu+SiC F400 90/10 видно довольно большое количество пор.

В образце Cu+SiC F400 80/20 пористостей не обнаружено, но на фото четко видна граница

между двумя слоями порошка (рис. 19), что также может быть причиной плохой микроструктуры и дальнейших разрушений в ходе испытаний.

На рис. 17 также видно, что покрытие с 30% керамики обладает равномерной микроструктурой и отсутствием каких-либо дефектов. Это может говорить, что в данном образце сделан оптимальный выбор технологических параметров и количества карбида кремния в покрытии.

Фото, полученные с электронного сканирующего микроскопа, дали наглядное представление об адгезии между покрытием и подложкой. На рис. 20, а виден дефект и отсутствие адгезии между подложкой и покрытием Cu+SiC F400 80/20, напыленным при температуре 400°C, на рис. 20, б наблюдается хорошая адгезия у покрытия Cu+SiC F400 80/20, напыленным при температуре 500°C.

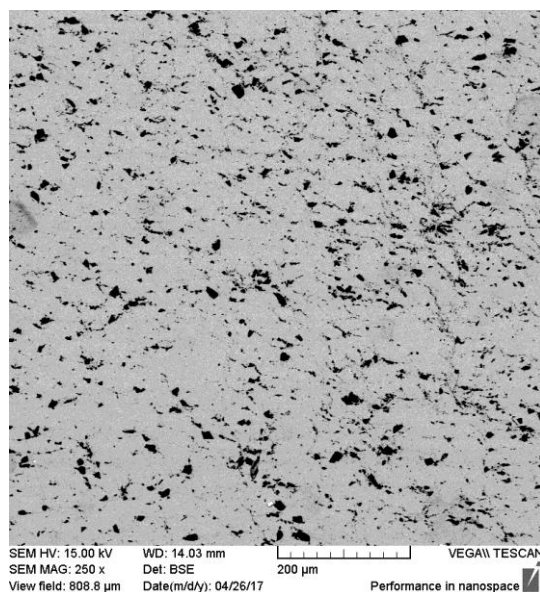


Рис. 17. Микроструктура покрытия Cu+SiC F400 70/30

Fig. 17. Microstructure of Cu+SiC F400 70/30 coating

Таблица 3. Процентное содержание карбида кремния в покрытии

Table 3. Silicon carbide percentage in the coating

Смесь	$T, ^\circ\text{C}$	Содержание карбида по массе, %	Содержание карбида по объему, %	Содержание карбида в покрытии по объему, %
Cu+SiC(F400)	400	20	41,5	4,2
Cu+SiC(F400)	500	30	55	7,6
Cu+SiC(F400)	500	20	41,5	4,3
Cu+SiC(F400)	500	10	24	2,9
Cu+SiC(F1200)	500	30	55	4,4
Cu+SiC(F1200)	500	10	24	3,5

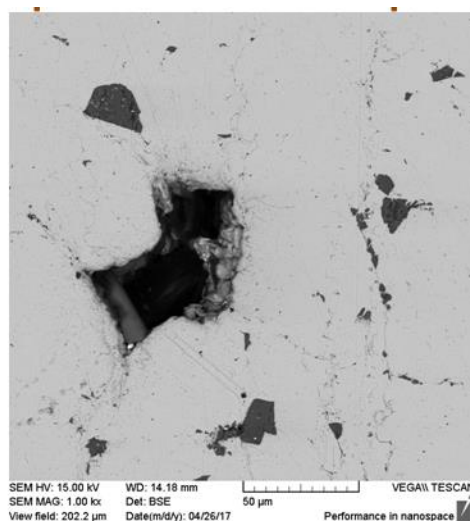
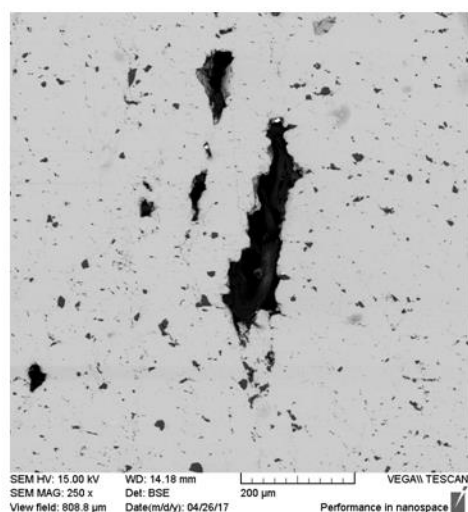


Рис. 18. Микроструктура покрытия Cu+SiC F400 90/10

Fig. 18. Microstructure of Cu+SiC F400 90/10 coating

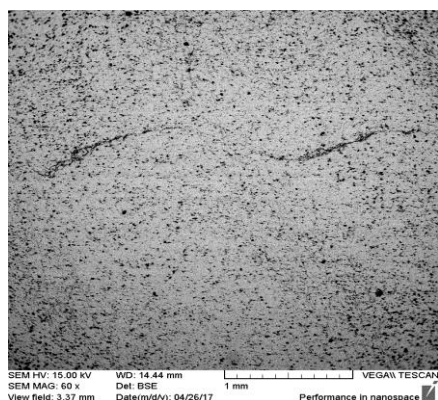
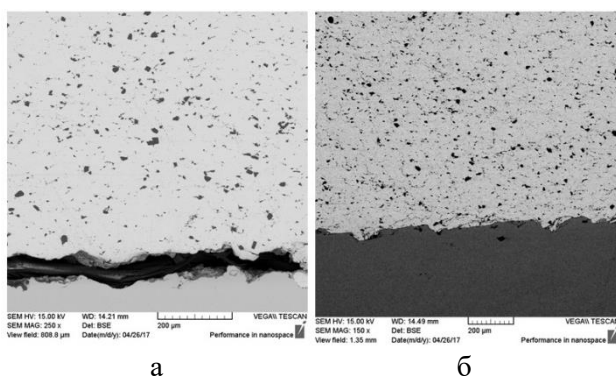


Рис. 19. Микроструктура покрытия
Cu+SiC F400 80/20

Fig. 19. Microstructure of Cu+SiC F400 80/20 coating



а

б

Рис. 20. Адгезия между подложкой и покрытием

Fig. 20. Adhesion between the substrate and the coating

Микротвердость покрытий

Для каждого покрытия и подложки был выполнен ряд измерений (не менее 20 точек) микротвердости по Викерсу. Средние значения микротвердости каждого покрытия были сведены в табл. 4.

Таблица 4. Микротвердость покрытий и подложки
Table 4. Microhardness of coatings and the substrate

Образец	Среднее значение микротвердости, HV
70Cu30SiC_F400_400C	109
70Cu30SiC_F400_500C	97
70Cu30SiC_F1200_500C	107
80Cu20SiC_F400_400C	108
80Cu20SiC_F400_500C	97
90Cu10SiC_F400_400C	94
90Cu10SiC_F400_500C	88
90Cu10SiC_F1200_400C	107
90Cu10SiC_F1200_500C	98
Стальная подложка	123

Из приведенных значений можно сделать вывод, что температура процесса оказывает влияние на микротвердость полученных покрытий. В среднем при повышении температуры от 400 до 500°C микротвердость уменьшается на 12 единиц.

Заключение

В ходе эксперимента было выявлено следующее:

1. Подготовка поверхности и её шероховатость является важным фактором для получения покрытия с хорошей адгезией. Результаты показывают, что подложка, обработанная мелким абразивом ($Ra = 6,4585$, $Rz = 40,2872$), имеет плохую адгезию с покрытием по сравнению с подложкой, обработанной крупным абразивом ($Ra = 13,0836$, $Rz = 67,1559$).

2. Напыление чистой меди без карбида кремния методом ХГН технологически невозможно в виду отсутствия адгезии к подложке. Это ещё раз подтверждает положительность решения о добавлении частиц карбида кремния в смесь.

3. Применение порошка мелкой фракции приводит к уменьшению эффективности напыления ввиду агломерирования мелких частиц в смеси и последующее засорение ствола установки.

4. Как показали испытания на сжатие, все покрытия обладают изотропностью механических свойств во всех направлениях. Кроме того, наилучшими механическими свойствами обладает покрытие с 30% карбида кремния.

5. Фото, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа, также говорят о том, что покрытие с 30% карбида кремния обладает лучшей микроструктурой по сравнению с покрытиями с 10 и 20% карбида кремния.

6. Измерения на микротвердость показали, что при повышении температуры рабочего газа с 400 до 500°C микротвердость в среднем уменьшается на 12 единиц по Викерсу, но все же соответствует допустимым значениям.

7. Однако расчеты, полученные при помощи программного комплекса, говорят о том, что с повышением температуры потока газа до 500°C растет эффективность напыления порошка.

В целом были получены оптимальные технологические параметры процесса ХГН, а также оптимальное содержание карбида кремния в смеси, которые дают высококачественные покрытия с нужными механическими свойствами.

Список источников

1. Wang Q., Birbilis N. and Zhang M.X., On the formation of a diffusion bond from cold-spray coatings, *Metall. Mater. Trans. A: Phys. Metall. Mater. Sci.*, 2012, 43, 1395-1399.
2. Lee M.S., Choi H.J., Choi J.W. and Kim H.J., Application of cold spray coating technique to an underground disposal copper canister and its corrosion properties, *Nucl. Eng. Technol.*, 2011, 43, 557-566.
3. King P.C., Bae G., Zahiri S.H., Jahedi M. and Lee C., An experimental and finite element study of cold spray copper impact onto two aluminum substrates, *J. Thermal Spray Technology*, 2010, 19, 620-634.
4. Fukumoto M., Terada H., Mashiko M., Sato K., Yamada M. and Yamaguchi E., Deposition of copper fine particle by cold spray process, *Mater. Trans.*, 2009, 50, 1482-1488.
5. Karthikeyan J. and Kay A., Cold spray processing of copper and copper alloys, *Adv. Mater. Process.*, 2005, 163, 49.
6. Champagne V.K., Jr, Helfrich D., Leyman P., Grendahl S. and Klotz B., Interface material mixing formed by the deposition of copper on aluminum by means of the cold spray process, *J. Thermal Spray Technology*, 2005, 14, 330-334.
7. Li W.-Y., Zhang G., Zhang C., Elkedim O., Liao H. and Coddet C., Improvement of microstructure and property of cold sprayed Cu-4at.% Cr-2at.% Nb alloy by heat treatment, *Scr. Mater.*, 2006, 55, 327-330.
8. Koivuluoto H., Coleman A., Murray K., Kearns M. and Vuoristo P., High pressure cold sprayed (HPCS) and low pressure cold sprayed (LPCS) coatings prepared from OFHC Cu Feedstock: overview from powder characteristics to coating properties, *J. Thermal Spray Technology*, 2012, 21, 1065-1075.
9. Koivuluoto H., Lagerbom J. and Vuoristo P., Microstructural studies of cold sprayed copper, nickel, and nickel-30% copper coatings, *J. Thermal Spray Technology*, 2007, 16, 488-497.
10. Fernandez R., MacDonald D., Nastic' A., Jodoin B., Tieu A. and Vijay M. Enhancement and Prediction of Adhesion Strength of Copper Cold Spray Coatings on Steel Substrates for Nuclear Fuel Repository, *J. Thermal Spray Technology* (2016) 25: 1577-1587.
11. Klinkov S.V., Kosarev* V.F., Ryashin N.S. and Shikalov V.S. Experimental study of cold gas spraying through a mask. Part 1, Thermophysics and Aeromechanics, 2016, vol. 23, no. 5.
12. Rastjagaev E., Wilde J., Wielage B., Grund T. and Kummel S., Development and testing of cold gas sprayed circuit boards for power electronics applications, *Proc. 7th Int. Conf. on Integrated power electronics systems*, Nuremberg, Germany, March 2012, IEEE Power Electronics Society, 154-159.
13. Marx S., Paul A., Kohler A. and Huttel G., Cold spraying: innovative layers for new applications, *J. Thermal Spray Technology*, 2006, 15, 177-183.
14. Grund W.T., Rupprecht C., Kuemmel S. and Wielage B. New method for producing power electronic circuit boards by cold-gas spraying and investigation of adhesion mechanisms, *Surface & Coatings Technology*, 2010, vol. 205, no. 4, pp. 1115-1118.
15. Nepochatov Yu., Deis G., Bogaev A. and Shkodkin A. Developing the technology for manufacturing metalplated substrates for power electronics units, *Sovremennaya Elektronika*, 2010, no. 9, pp. 12-15.
16. Ernst K.-R., Braeutigam J., Gaertner F. and Klassen T. Effect of substrate temperature on cold-gas-sprayed coatings on ceramic substrates, *J. Thermal Spray Technology*, 2013, vol. 22, no. 2-3, pp. 422-432.
17. Donner K.-R., Gaertner F. and Klassen T. Metallization of thin Al₂O₃ layers in power electronics using cold gas spraying, *J. Thermal Spray Technology*, 2011, vol. 20, no. 1-2, pp. 299-306.
18. Boyle C.H. and Meguid S.A. Mechanical Performance of Integrally Bonded Copper Coatings for the Long Term Disposal of Used Nuclear Fuel, *Nucl. Eng. Des.*, 2015, 293, pp. 403-412.
19. Keech P.G., Vo P., Ramamurthy S., Chen J., Jacklin R. and Shoesmith D.W. Design and Development of Copper Coatings for Long Term Storage of Used Nuclear Fuel, *Corros. Eng. Sci. Technol.*, 2014, 49(6), pp. 425-430.
20. Nuclear Waste Management Organization, Preliminary Assessment for Siting a Deep Geological Repository for Canada's Used Nuclear Fuel: The corporation of the town of Blind River, Ontario, Toronto, ON, 2014.
21. Irissou E., Vo D.P.P., Keech P. and Legoux J.G. Cold Sprayed Corrosion Protection Coating for Nuclear Waste Repository Canister, in *North American Cold Spray Conference*, 2012.
22. Fukumoto M., Wada H., Tanabe K., Yamada M., Yamaguchi E., Niwa A., Sugimoto M. and Izawa M. Effect of Substrate Temperature on Deposition Behavior of Copper Particles on Substrate Surfaces in the Cold Spray Process, *J. Thermal Spray Technology*, 2007, 16(5-6), pp. 643-650.
23. Huang R., Ma W. and Fukanuma H. Development of Ultra-Strong Adhesive Strength Coatings Using Cold Spray, *Surf. Coatings Technol.*, 2014, 258, pp. 832-841.
24. Jakupi P., Keech P.G., Barker I., Ramamurthy S., Jacklin R.L., Shoesmith D.W. and Moser D.E. Characterization of Commercially Cold Sprayed Copper Coatings and Determination of the Effects of Impacting Copper Powder Velocities, *J. Nucl. Mater.*, 2015, 466, pp. 1-11.
25. Partovi-Nia R., Ramamurthy S., Zagidulin D., Chen J., Jacklin R., Keech P. and Shoesmith D.W. Corrosion of Cold Spray Deposited Copper Coating on Steel Substrates, *Corrosion*, 2015, 71(10), pp. 1237-1247.
26. Standish T., Chen J., Jacklin R., Jakupi P., Ramamurthy S., Zagidulin D., Keech P. and Shoesmith D. Corrosion of Copper-Coated Steel High Level Nucle-

- ar Waste Containers Under Permanent Disposal Conditions, *Electrochim. Acta*, 2016.
27. Maev E.R.G., Leshchynsky V., Strumban E. and Dzhurinskiy D. Influence of Grit Blasting on the Interface Roughness and Adhesion Strength of Cold Sprayed Copper Coatings, in *Thermal Spray 2015: Proceedings from the International Thermal Spray Conference and Exposition, 2015*, pp. 493-497.
 28. Maev R.G., Leshchynsky V., Strumban E., Dzhurinskiy D., Kocimski J. and Maeva E. Structure and Mechanical Properties of Thick Copper Coating Made by Cold Spray, *J. Thermal Spray Technology*, 2016, 25(1), pp. 113-122.
 29. Choi H.-J., Lee M. and Lee J.Y. Application of a cold Spray Technique to the Fabrication of a Copper Canister for the Geological Disposal of CANDU Spent Fuels, *Nucl. Eng. Des.*, 2010, 240(10), pp. 2714-2720.
 30. DOE/RW-0576, 2005. Science and Technology Program Plan. DOE, USA.
 31. Borchers C., Gartner F., Stoltenhoff T., Assadi H., Kreye H., Gartner F., Stoltenhoff T., Assadi H. and Kreye H. Microstructural and Macroscopic Properties of Cold Sprayed Copper Coatings, *J. Appl. Phys.*, 2003.
 32. Fukanuma H., Ohno N., Toda JPN A study of adhesive strength of cold spray coatings, *Thermal Spray 2004: Advances in Technology and Applications* (ASM International), 2004.
 33. Renzhong Huang, Wenhua Ma, Hirotaka Fukanuma, Development of ultra-strong adhesive strength coatings using cold spray, *Surface & Coatings Technology*, 2014.
 34. Masahiro Fukumoto, Hiroki Teradal, Masahiro Mashiko, Kazunori Sato, Motohiro Yamada and Eiji Yamaguchi, Deposition of Copper Fine Particle by Cold Spray Process, *Materials Transactions*, vol. 50, no. 6, 2009.
 35. XIE Jing, Nelias Daniel, Walter-Le Berre Hélène, Ichikawa Yuji, Ogawa Kazuhiro, Numerical simulation of the cold spray deposition process for aluminium and copper, *Proceedings of the ASME 2012 11th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis ESDA2012 July 2-4, 2012*.
- References**
1. Wang Q., Birbilis N., Zhang M.X. On the formation of a diffusion bond from cold-spray coatings. *Metall. Mater. Trans. A: Phys. Metall. Mater. Sci.*, 2012, 43, 1395-1399.
 2. Lee M.S., Choi H.J., Choi J.W., Kim H.J. Application of cold spray coating technique to an underground disposal copper canister and its corrosion properties. *Nucl. Eng. Technol.*, 2011, 43, 557-566.
 3. King P.C., Bae G., Zahiri S.H., Jahedi M., Lee C. An experimental and finite element study of cold spray copper impact onto two aluminum substrates. *J. Thermal Spray Technology*, 2010, 19, 620-634.
 4. Fukumoto M., Terada H., Mashiko M., Sato K., Yamada M., Yamaguchi E. Deposition of copper fine particle by cold spray process. *Mater. Trans.*, 2009, 50, 1482-1488.
 5. Karthikeyan J., Kay A. Cold spray processing of copper and copper alloys. *Adv. Mater. Process.*, 2005, 163, 49.
 6. Champagne V.K., Helfrich D. Jr, Leyman P., Grendahl S., Klotz B. Interface material mixing formed by the deposition of copper on aluminum by means of the cold spray process. *J. Thermal Spray Technology*, 2005, 14, 330-334.
 7. Li W.-Y., Zhang G., Zhang C., Elkedim O., Liao H., Coddet C. Improvement of microstructure and property of cold sprayed Cu-4at.% Cr-2at.% Nb alloy by heat treatment. *Scr. Mater.*, 2006, 55, 327-330.
 8. Koivuluoto H., Coleman A., Murray K., Kearns M., Vuoristo P. High pressure cold sprayed (HPCS) and low pressure cold sprayed (LPCS) coatings prepared from OFHC Cu Feedstock: overview from powder characteristics to coating properties. *J. Thermal Spray Technology*, 2012, 21, 1065-1075.
 9. Koivuluoto H., Lagerbom J., Vuoristo P. Microstructural studies of cold sprayed copper, nickel, and nickel-30% copper coatings. *J. Thermal Spray Technology*, 2007, 16, 488-497.
 10. Fernandez R., MacDonald D., Nastic' A., Jodoin B., Tieu A., Vijay M. Enhancement and prediction of adhesion strength of copper cold spray coatings on steel substrates for nuclear fuel repository. *J. Thermal Spray Technology*, 2016, 25, 1577-1587.
 11. Klinkov S.V., Kosarev V.F., Ryashin N.S., Shikalov V.S. Experimental study of cold gas spraying through a mask. Part 1, Thermophysics and Aeromechanics, 2016, 23, 5.
 12. Rastjagaev E., Wilde J., Wielage B., Grund T., Kummel S. Development and testing of cold gas sprayed circuit boards for power electronics applications, *Proc. 7th Int. Conf. on Integrated power electronics systems, Nuremberg, Germany, March 2012, IEEE Power Electronics Society*, 154-159.
 13. Marx S., Paul A., Kohler A., Huttel G. Cold spraying: innovative layers for new applications. *J. Thermal Spray Technology*, 2006, 15, 177-183.
 14. Grund W.T., Rupprecht C., Kuemmel S., Wielage B. New method for producing power electronic circuit boards by cold-gas spraying and investigation of adhesion mechanisms. *Surface & Coatings Technology*, 2010, 205 (4), 1115-1118.
 15. Nepchatov Yu., Deis G., Bogaev A., Shkodkin A. Developing the technology for manufacturing metalplated substrates for power electronics units. *Sovremennaya elektronika* [Modern Electronics], 2010, no. 9, pp. 12-15. (In Russ.)
 16. Ernst K.-R., Braeutigam J., Gaertner F., Klassen T. Effect of substrate temperature on cold-gas-sprayed coatings on ceramic substrates. *J. Thermal Spray Technology*, 2013, 22 (2-3), 422-432.

17. Donner K.-R., Gaertner F., Klassen T. Metallization of thin Al₂O₃ layers in power electronics using cold gas spraying. *J. Thermal Spray Technology*, 2011, 20 (1-2), 299-306.
18. Boyle C.H., Meguid S.A. Mechanical performance of integrally bonded copper coatings for the long term disposal of used nuclear fuel. *Nucl. Eng. Des.*, 2015, 293, 403-412.
19. Keech P.G., Vo P., Ramamurthy S., Chen J., Jacklin R., Shoesmith D.W. Design and development of copper coatings for long term storage of used nuclear fuel. *Corros. Eng. Sci. Technol.*, 2014, 49(6), 425-430.
20. Nuclear Waste Management Organization. Preliminary assessment for siting a deep geological repository for Canada's used nuclear fuel: The corporation of the town of Blind River, Ontario, Toronto, ON, 2014.
21. Irissou E., Vo D.P.P., Keech P., Legoux J.G. Cold sprayed corrosion protection coating for nuclear waste repository canister. *North American Cold Spray Conference*, 2012.
22. Fukumoto M., Wada H., Tanabe K., Yamada M., Yamaguchi E., Niwa A., Sugimoto M., Izawa M. Effect of substrate temperature on deposition behavior of copper particles on substrate surfaces in the cold spray process. *J. Thermal Spray Technology*, 2007, 16(5-6), 643-650.
23. Huang R., Ma W., Fukanuma H. Development of ultra-strong adhesive strength coatings using cold spray. *Surf. Coatings Technology*, 2014, 258, 832-841.
24. Jakupi P., Keech P.G., Barker I., Ramamurthy S., Jacklin R.L., Shoesmith D.W., Moser D.E. Characterization of commercially cold sprayed copper coatings and determination of the effects of impacting copper powder velocities. *J. Nucl. Mater.*, 2015, 466, 1-11.
25. Partovi-Nia R., Ramamurthy S., Zagidulin D., Chen J., Jacklin R., Keech P., Shoesmith D.W. Corrosion of cold spray deposited copper coating on steel substrates. *Corrosion*, 2015, 71(10), 1237-1247.
26. Standish T., Chen J., Jacklin R., Jakupi P., Ramamurthy S., Zagidulin D., Keech P., Shoesmith D. Corrosion of copper-coated steel high level nuclear waste containers under permanent disposal conditions. *Electrochim. Acta*, 2016.
27. Maev R.Gr., Leshchynsky V., Strumban E., Dzhurinskiy D., Maeva E. Influence of grit blasting on the interface roughness and adhesion strength of cold sprayed copper coatings. *Thermal Spray 2015: Proceedings from the International Thermal Spray Conference and Exposition*, 2015, pp. 493-497.
28. Maev R.Gr., Leshchynsky V., Strumban E., Dzhurinskiy D., Kocinski J., Maeva E. Structure and mechanical properties of thick copper coating made by cold spray. *J. Thermal Spray Technology*, 2016, 25(1), 113-122.
29. Choi H.-J., Lee M., Lee J.Y. Application of a cold spray technique to the fabrication of a copper canister for the geological disposal of CANDU spent fuels. *Nucl. Eng. Des.*, 2010, 240(10), 2714-2720.
30. DOE/RW-0576, 2005. Science and Technology Program Plan. DOE, USA.
31. Borchers C., Gartner F., Stoltenhoff T., Assadi H., Kreye H., Gartner F., Stoltenhoff T., Assadi H., Kreye H. Microstructural and macroscopic properties of cold sprayed copper coatings. *J. Appl. Phys.*, 2003.
32. Fukanuma H., Ohno N. A study of adhesive strength of cold spray coatings. *Thermal Spray 2004: Advances in Technology and Applications (ASM International)*, 2004.
33. Renzhong Huang, Wenhua Ma, Hirotaka Fukanuma. Development of ultra-strong adhesive strength coatings using cold spray. *Surface & Coatings Technology*, 2014.
34. Masahiro Fukumoto, Hiroki Terada, Masahiro Mashiko, Kazunori Sato, Motohiro Yamada, Eiji Yamaguchi. Deposition of copper fine particle by cold spray process. *Materials Transactions*, 2009, 50 (6).
35. Jing Xie, Nelias Daniel, Walter-Le Berre Hélène, Ichikawa Yuji, Ogawa Kazuhiro. Numerical simulation of the cold spray deposition process for aluminium and copper. *Proceedings of the ASME 2012 11th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis ESDA2012*, July 2-4, 2012.

Поступила 24.10.2022; принята к публикации 28.10.2022; опубликована 22.12.2022

Submitted 24/10/2022; revised 28/10/2022; published 22/12/2022

Серебряков Иван Сергеевич – кандидат технических наук, инженер,
SARDOU SA, Сен-Суппле, Франция.
Email: ivan-serebr@yandex.ru.

Латфулина Юлия Сергеевна – научный сотрудник,
Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск, Россия.
Email: latfulina174@gmail.com. ORCID 0000-0002-2128-3965

Напримерова Елена Дмитриевна – студентка,
Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск, Россия.
Email: naprimerovaed@susu.ru.

Мясоедов Вячеслав Александрович – студент,
Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск, Россия.
Email: vmyasoedov74@mail.ru.

Самодурова Марина Николаевна – доктор технических наук, профессор,
Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск, Россия.
Email: samodurovamn@susu.ru. ORCID 0000-0002-1505-1068

Ivan S. Serebriakov – PhD (Eng.), Engineer,
SARDOU SA, Saint-Soupplets, France.
Email: ivan-serebr@yandex.ru.

Yuliya S. Latfulina – Research Associate,
South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia.
Email: latfulina174@gmail.com. ORCID 0000-0002-2128-3965

Elena D. Naprimerova – student,
South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia.
Email: naprimerovaed@susu.ru.

Vyacheslav A. Myasoedov – student,
South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia.
Email: vmyasoedov74@mail.ru.

Marina N. Samodurova – DrSc (Eng.), professor,
South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia.
Email: samodurovamn@susu.ru. ORCID 0000-0002-1505-1068

СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

STANDARDIZATION, CERTIFICATION AND QUALITY MANAGEMENT

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

УДК 006.057.2:621.774

DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-4-83-94



ПРИМЕНЕНИЕ АЛФАВИТНОГО ПОДХОДА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА ИНФОРМАЦИИ, СОДЕРЖАЩЕЙСЯ В СТАНДАРТАХ

Казанцева Т.В.¹, Казанцева Н.К.¹, Полякова М.А.², Пиджакова Е.Н.¹, Александров В.А.³

¹ Уральский федеральный университет им. первого президента Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

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

³ Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия

Аннотация. В современных условиях цифровой трансформации роль стандартов значительно увеличивается. Стандарты предшествуют инновациям и становятся основой для внедрения инноваций. В настоящее время фонд национальных стандартов свыше 30000. Однако как можно более определенно оценить объем данной информации? Авторами предложена методика оценки размера информации, содержащейся в стандартах, на примере стандартов, относящихся к цветной металлургии группы 77.120 в соответствии с общероссийским классификатором стандартов. Определение размера информации осуществлялось через введенную величину «оцененный объем информации в стандарте» на основе репрезентативной выборки стандартов из группы 77.120. В исследовании использована стратифицированная выборка, в которой генеральная совокупность разбивается на однородные части (страты) по определенному признаку, а затем из них производится систематический или простой случайный отбор. В качестве признака расслоения рассматриваемой базы данных приняты девять подгрупп группы 77.120: 77.120.01, 77.120.10, 77.120.20, 77.120.30, 77.120.40, 77.120.50, 77.120.60, 77.120.70, 77.120.99, а также по шесть временных интервалов принятия действующих стандартов: 1970-1979; 1980-1989, 1990-1999, 2000-2009, 2010-2019, 2020-2022. Объем выборки составил 155 стандартов, или 20% от всей базы стандартов группы 77.120. В процессе исследования выявлено, что для временных интервалов 1970-1979 и 1980-1989 гг. оцененный объем информации на 6-8% меньше, чем количество действующих стандартов, принятых в указанные временные интервалы. Для временного интервала 2010-2019 гг. картина обратная: оцененный объем информации в данный период ~ на 12% больше, чем количество стандартов. Данные, полученные по отдельным подгруппам и временным интервалам, позволяют сделать вывод, что стандарты, принятые после 2010 г., как правило, имеют значительно больший оцененный объем информации.

Ключевые слова: информация, размер информации, стандарт, символ, информационная мощность, классификационная группа, классификационные подгруппы, временной интервал

© Казанцева Т.В., Казанцева Н.К., Полякова М.А., Пиджакова Е.Н., Александров В.А., 2022

Для цитирования

Применение алфавитного подхода для определения количества информации, содержащейся в стандартах / Казанцева Т.В., Казанцева Н.К., Полякова М.А., Пиджакова Е.Н., Александров В.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №4. С. 83-94. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-83-94>



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

APPLYING AN ALPHABETICAL APPROACH TO DETERMINE THE AMOUNT OF INFORMATION CONTAINED IN STANDARDS

Kazantseva T.V.¹, Kazantseva N.K.¹, Polyakova M.A.², Pidzhakova E.N.¹, Aleksandrov V.A.³

¹ Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

² Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

³ Ural State Agrarian University, Yekaterinburg, Russia

Abstract. In the current conditions of digital transformation, a role of standards increases significantly. Standards precede innovations and become the basis for their introduction. A current pool of national standards includes over 30,000 documents. However, how is it possible to estimate the amount of this information more definitely? The authors propose a method for estimating the amount of information contained in the standards using the example of standards related to non-ferrous metallurgy group 77.120 in accordance with the All-Russian Classifier of Standards. The amount of information was determined using the introduced value of “the estimated amount of information in the standard” based on a representative sample of standards from group 77.120. The study used a stratified sample, where the parent population was divided into homogeneous parts (strata) according to a certain attribute, and then systematic or simple random sampling was performed. An indicator of the stratification of the database under study was taken as nine subgroups of group 77.120: 77.120.01, 77.120.10, 77.120.20, 77.120.30, 77.120.40, 77.120.50, 77.120.60, 77.120.70, 77.120.99, as well as six time intervals for the adoption of the existing standards: 1970-1979; 1980-1989, 1990-1999, 2000-2009, 2010-2019, 2020-2022. The sample size was 155 standards or 20% of the entire base of standards of group 77.120. The study revealed that for the 1970-1979 and 1980-1989 time intervals the estimated amount of information was 6-8% less than the number of current standards adopted within the specified time intervals. The reverse is true for 2010-2019: the estimated amount of information in this period is by approximately 12% higher than the number of standards. The data obtained for individual subgroups and time intervals allow us to conclude that, as a rule, the standards adopted after 2010 have a much larger estimated amount of information.

Keywords: information, amount of information, standard, symbol, information cardinality, classification group, classification subgroups, time interval

For citation

Kazantseva T.V., Kazantseva N.K., Polyakova M.A., Pidzhakova E.N., Aleksandrov V.A. Applying an Alphabetical Approach to Determine the Amount of Information Contained in Standards. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 4, pp. 83-94. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-83-94>

Введение

Знаменитую фразу, принадлежащую Н. Ротшильду: «Кто владеет информацией, тот владеет миром», в настоящее время можно немного уточнить: «Кто владеет *качественной* информацией, тот владеет миром». Качественная информация предполагает достоверность, объективность и предсказуемость размера информации. Сам термин «информация» – один из самых дискуссионных в науке, известно огромное количество разных вариантов его трактовки и уточнение данного термина продолжается [1-4].

Не менее известное высказывание Норберта Винера, одного из основателей кибернетики и теории искусственного интеллекта, звучит следующим образом: «Информация – это не материя и не энергия, информация – это информация» [5].

Также можно добавить: есть информация и информация. В частности, информация, содержащаяся в стандартах, – это элитные данные, которые представляют национальное достояние страны, сведения, обобщающие опыт и достижения науки и техники, за которые заплачена высокая цена и порой самая дорогая – человеческая жизнь. И такую информацию необходимо сохранять, обогащать новыми сведениями и передавать по наследству.

В современных условиях цифровой трансформации роль стандартов значительно увеличивается, при этом можно говорить о новой функции стандартизации. Стандарты предшествуют инновациям и становятся основой для внедрения инноваций [6-12]. В такой ситуации важно иметь представление о размере информации, содержащейся в стандартах, для выбора соответствующей компьютерной техники [13-17].

Как можно оценить размер информации, находящейся в стандартах. Мы попробовали ответить на этот вопрос, используя язык единиц измерения государственной системы обеспечения единства измерений. Термин «количество информации» в соответствии с ГОСТ 8.417-2002 «ГСИ. Единицы величин» рассматривается как единица информации в двоичной системе исчисления (двоичная единица информации) применительно к устройствам цифровой обработки и передачи информации. Главной причиной введения единиц «бит» и «байт» явилась потребность определения объёма запоминающих устройств, количества памяти, используемой компьютерной программой. Данный термин можно определить как формальный, который отражает форму, но не содержание. С другой стороны, количество рано или поздно переходит в качество, которое уже отражает ценность информации [14, 15].

В процессе данного исследования предприятия попытка оценить информацию, содержащуюся в стандартах, относящихся к группе 77.120 Цветные металлы, раздела 77 – Металлургия в соответствии с общероссийским классификатором стандартов (ОКС (ОК001-2021 (ИСО МКС)).

Методика исследования

В процессе определения количества информации выделяют два подхода – вероятностный и алфавитный [13].

Вероятностный (энтропийный) подход – это подход, который учитывает ценность информации, содержащейся в сообщении для его получателя. К. Шеннон определил понятие «информация» как снятую неопределенность. Общая мера неопределенностей называется энтропией. В этом подходе количество информации – это мера уменьшения неопределённости знаний при получении информационных сообщений. Чтобы пользоваться рассмотренным подходом, необходимо вникать в содержание сообщения [18-21].

Алфавитный подход позволяет определить количество знаков, содержащихся в тексте, и поэтому является объективным, так как он не зависит от субъекта, воспринимающего текст. Этот подход не связывает количество информации с содержанием сообщения. В процессе данного исследования был использован именно данный подход.

При алфавитном подходе считается, что каждый символ текста имеет информационную емкость, которая зависит от мощности алфавита [10]:

$$i = \log_2 N, \quad (1)$$

где i – информационная емкость; N – мощность алфавита.

Множество символов, используемых при записи текста, называется алфавитом, а полное количество символов в алфавите называют мощностью алфавита. Например, мощность алфавита, набранного с клавиатуры, равна 256 (строчные и прописные, латинские и русские буквы, цифры, знаки арифметических операций, скобки, знаки препинания и т.д.).

Если весь текст состоит из K символов, то при алфавитном подходе размер содержащейся в нем информации I , выражаемой в Кбайт, рассчитывается по формуле

$$I = K \cdot i. \quad (2)$$

Для определения размера информации в стандарте авторами было введено следующее понятие: *Оцененный объем информации в стандарте – это произведение суммарного количества символов K , содержащихся в стандарте, на информационный вес символа в выбранной кодировке UNI CODE (UTF-8).*

При определении объема информации в стандарте были сделаны следующие допущения:

- общий объем информации в стандарте складывается из официальной и содержательной частей: официальная часть информации включает название стандарта, коды, дату введения, разработчиков и другие сведения до введения; содержательная часть – которая включает сведения, начиная с введения и далее;
- все символы алфавита встречаются в тексте с одинаковой частотой;
- рисунки, встречающиеся в тексте стандартов, не учитывались.

Полученные результаты и их обсуждение

По состоянию на май 2022 г. в данной группе насчитывается 777 действующих стандартов. Состав базы стандартов группы 77.120 по подгруппам и временным интервалам их принятия представлен в **табл. 1** [22-25].

Для определения оцененного объема информации, содержащейся в стандартах группы 77.120, необходимо оценить ее объем в репрезентативной выборке стандартов.

В исследованиях использована стратифицированная выборка – выборка, при которой, перед тем как начать отбор, генеральная совокупность разбивается на однородные части (страты) по определенному признаку, а затем из них производится систематический или простой случайный отбор.

Таблица 1. Состав стандартов группы 77.120 Цветные металлы в соответствии с ОКС (ОК001-2021 (ИСО МКС))
Table 1. Standards of group 77.120 Non-Ferrous Metals according to the All-Russian Classifier of Standards (OK001-2021 (ISO ICS))

	Подгруппы группы 77.120	Количество стандартов, принятых в указанный временной интервал, шт.						Общее количество стандартов, шт.
		1970-1979	1980-1989	1990-1999	2000-2009	2010-2019	2020-2022	
Группа 77.120 Цветные металлы	77.120.01 Цветные металлы в целом	5	3	1	1	2	–	12
	77.120.10 Алюминий и алюминиевые сплавы	17	4	34	–	9	–	64
	77.120.20 Магний и магниевые сплавы	26	–	14	–	–	–	40
	77.120.30 Медь и медные сплавы	65	12	16	3	16	–	111
	77.120.40 Никель, хром и их сплавы	–	6	29	1	36	–	72
	77.120.50 Титан и титановые сплавы	1	1	44	–	1	1	48
	77.120.60 Свинец, цинк, олово и их сплавы	53	26	25	6	3	–	113
	77.120.70 Кадмий, кобальт и их сплавы	19	1	2	–	1	1	24
	77.120.99 Цветные металлы и их сплавы прочие	104	126	18	11	32	2	293
Всего стандартов по каждому временному интервалу, шт.		289	179	183	22	100	4	777

В качестве признака расслоения рассматриваемой базы данных приняты следующие признаки расслоения:

- по девяти подгруппам: 77.120.01, 77.120.10, 77.120.20, 77.120.30, 77.120.40, 77.120.50, 77.120.60, 77.120.70, 77.120.99;
- по шести временным интервалам принятия действующих стандартов: 1970-1979, 1980-1989, 1990-1999, 2000-2009, 2010-2019, 2020-2022.

Объем выборки составил 155 стандартов или 20% от всей базы данных группы 77.120. Далее по 20% стандартов отбиралось от количества стандартов в каждой из девяти подгрупп, приведенных в **табл. 1**. Таким образом, была сформирована выборочная совокупность исследуемой базы данных, которая представлена в **табл. 2**.

Указанное в **табл. 2** число стандартов отбиралось из состава подгрупп по таблице случайных чисел. В результате такого отбора каждый стандарт, входящий в конкретную страту в генеральной совокупности, получал равные шансы с другими стандартами попасть в выборочную совокупность. Данные об общем количестве стра-

ниц и оцененном объеме информации по отдельным стратам выборки приведены в **табл. 3**.

В сформированной выборке среднее количество страниц в стандарте составило ~ 8 с. На **рис. 1** представлена информация о количестве страниц в стандартах всех подгрупп группы 77.120.

Наибольшее число отобранных стандартов содержат 4 страницы – это 28 стандартов, или 18% выборки, 20 стандартов содержат по 8 страниц текста и только по одному стандарту содержат 32, 24, 23 и 21 страницу.

На **рис. 2** представлено распределение всех стандартов выборки и соответствующего оцененного объема информации этих стандартов по временным интервалам принятия стандартов. Данные представлены в процентах, при этом наблюдается отличие между количеством стандартов и оцененным объемом информации. На диаграмме, приведенной на **рис. 2**, отчетливо наблюдается отличие между количеством стандартов и оцененным объемом информации в этих стандартах для разных временных интервалов.

Таблица 2. Структура выборочной совокупности базы стандартов группы 77.120
Table 2. Structure of a sampled population of the base of standards of group 77.120

Группа 77.120 Цветные металлы	Подгруппы	Количество стандартов, принятых в указанный временной интервал, шт.						Количество стандартов, шт.
		1970-1979	1980-1989	1990-1999	2000-2009	2010-2019	2020-2022	
	77.120.01	1	1	–	–	1	–	3
	77.120.10	3	1	7	–	1	–	12
	77.120.20	5	–	3	–	–	–	8
	77.120.30	13	2	3	1	3	–	22
	77.120.40	–	1	6	–	7	–	14
	77.120.50	–	–	9	–	–	–	9
	77.120.60	11	5	5	1	1	–	23
	77.120.70	4	–	1	–	–	–	5
	77.120.99	21	25	4	2	6	1	59
Всего стандартов по каждому временному интервалу, шт.		58	35	38	4	19	1	155

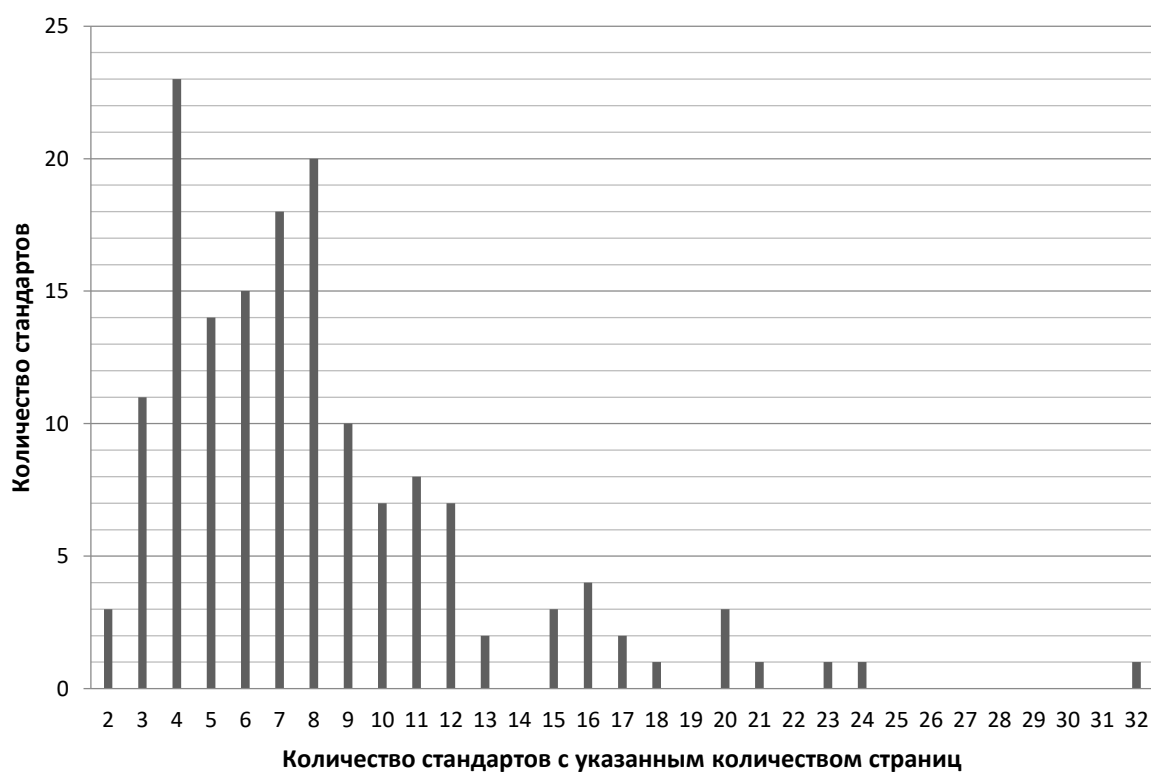


Рис. 1. Информация о количестве страниц в стандартах выборки
Fig. 1. Number of pages in the standards included in the sample

Таблица 3. Данные о количестве стандартов, общем количестве страниц и оцененном объеме информации по отдельным стратам

Table 3. Number of standards, total number of pages and estimated amount of information by individual strata

Группа 77.120 Цветные металлы	Подгруппы	Количество стандартов в выборке, шт./ общее количество страниц в стандартах, страниц/ общий оцененный объем информации, Кбайт/ оцененный содержательный объем информации, Кбайт						
		1970-1979	1980-1989	1990-1999	2000-2009	2010-2019	2020-2022	Сумма
	77.120.01	1/ 8/ 34,1/ 31,1	1/ 15/ 57,44/ 52,09	—	—	1/ 17/ 74,26/ 65,19	—	3/ 40/ 165,8/ 148,38
	77.120.10	3/ 16/ 70,19/ 65,68	1/52,09 11/ 14,54/ 11,97	7/ 54/ 156,58/ 130,50	—	1/ 13/ 31,9/ 24,14	—	12/ 94/ 273,21/ 232,55
	77.120.20	5/ 19/ 72,75/ 64,63	—	3/ 20/ 58,27/ 47,69	—	—	—	8/ 39/ 131,02/ 112,32
	77.120.30	13/ 89/ 325,22/ 299,63	2/ 8/ 29,38/ 26,29	3/ 31/ 88,49/ 776,53	1/ 9/ 31,59/ 26,88	3/ 54/ 213,28/ 195,35	—	22/ 191/ 687,96/ 624,68
	77.120.40	—	1/ 6/ 25,09/ 23,18	6/ 64/ 179,35/ 164,03	—	7/ 96/ 317,62/ 243,25	—	14/ 166/ 522,06/ 430,46
	77.120.50	—	—	9/ 72/ 211,95/ 182,74	—	—	—	9/ 72/ 211,95/ 182,74
	77.120.60	11/ 71/ 228,16/ 197,79	5/ 41/ 106,28/ 98,84	5/ 60/ 122,87/ 103,38	1/ 15/ 55,7/ 49,64	1/ 8/ 20,52/ 15,2	—	23/ 195/ 533,53/ 464,85
	77.120.70	4/ 18/ 69,78/ 62,32	—	1/ 6/ 16,27/ 13,15	—	—	—	5/ 24/ 86,05/ 75,47
	77.120.99	21/ 113/ 345,68/ 297,25	25/ 162/ 436,5/ 382,24	4/ 30/ 79,46/ 70,52	2/ 16/ 27,69/ 18,35	6/ 99/ 297,49/ 259,67	1/ 16/ 47,52/ 40,52	59/ 436/ 1234,34/ 1068,55
Всего стандартов по каждому временному интервалу, шт.		58/ 334/ 1145,88/ 1018,4	35/ 243/ 669,23/ 594,61	38/ 337/ 913,24/ 788,54	4/ 40/ 114,98/ 94,87	19/ 287/ 955,07/ 802,8	1/ 16/ 47,52/ 40,52	155/ 1257/ 3845,92/ 3339,72

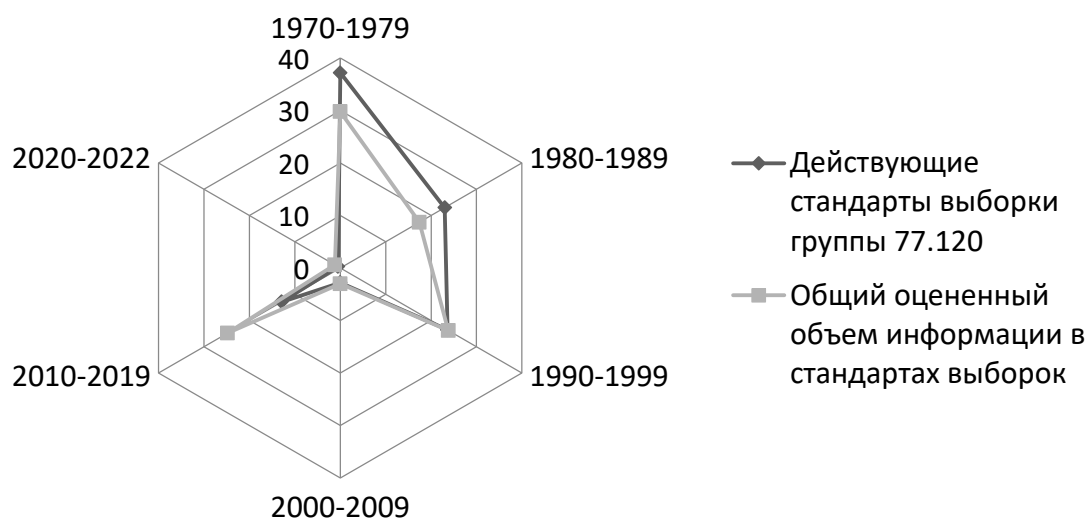


Рис. 2. Распределение всех стандартов выборки и оцененного общего объема информации этих стандартов по временным интервалам их принятия, выраженное в процентах

Fig. 2. Distribution of all the standards of the sample and the estimated total amount of information of such standards by the time intervals of their adoption expressed as a percentage

Так, для временных интервалов 1970-1979 и 1980-1989 гг. оцененный объем информации на 6-8% меньше, чем количество действующих стандартов, принятых в указанные временные интервалы. Для временного интервала 2010-2019 гг. картина обратная: оцененный объем информации в данный период ~ на 12% больше, чем количество стандартов.

Более детальная картина сравнения оцененного объема информации и количества стандартов выборки группы 77.120 по временным интервалам принятия этих стандартов приведены на **рис. 3**.

Диаграмма, приведенная на **рис. 3**, отчетливо демонстрирует следующие закономерности:

- для стандартов, принятых во временные интервалы 1970-1979 и 1980-1989 гг., оцененный объем общей информации и содержательной части информации на 6-7% меньше количества стандартов, принятых в этот временной интервал;
- для стандартов, принятых в 1990-1999 и 2000-2009 гг., соотношение этих величин выравнивается;
- для стандартов, принятых после 2010 г., оцененный объем информации как общей, так и содержательной части стандартов значительно превышает количество документов, принятых в этот период.

На **рис. 4** представлена сравнительная картина распределения количества действующих стандартов и оцененного объема общей и содержательной частей информации в стандартах по классификационным подгруппам группы 77.120.

На представленных диаграммах отчетливо заметно, что общая тенденция распределения количества стандартов и оцененного объема информации этих стандартов сохраняется. Наибольшее количество стандартов и максимальный оцененный объем информации соответствует подгруппе 77.120.99, далее следуют подгруппы 77.120.30 и 77.120.60. Однако подгруппы 77.120.01, 77.120.30 и 77.120.40 характеризуются тем, что оцененный объем информации как общей, так и содержательной частей превышает количество стандартов в этих подгруппах в процентном соотношении. Подгруппа 77.120.01 Цветные металлы в целом иллюстрирует наибольшее отличие в данном показателе, несмотря на то, что большая часть стандартов данной группы была принята до 2000 г. Для подгруппы 77.120.40 Никель, хром и их сплавы количество стандартов, принятых до и после 2000 г., примерно одинаковое, однако оцененный объем информации стандартов данной группы превышает количество документов примерно на 5%.

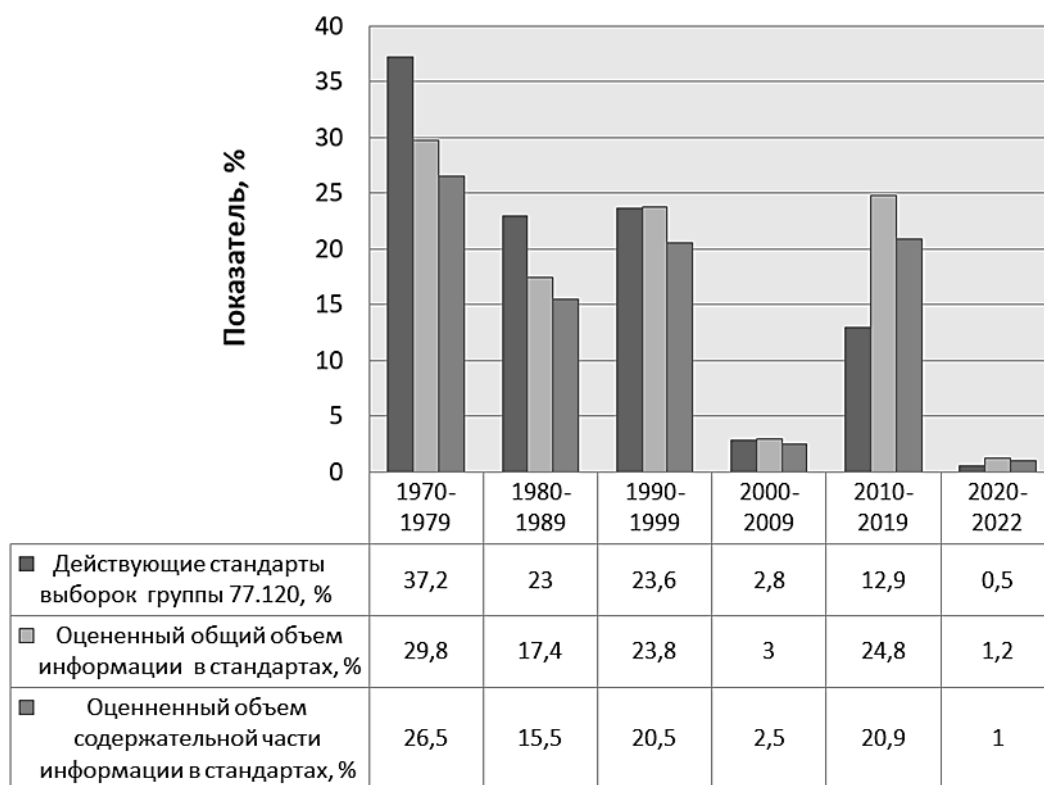


Рис. 3. Сравнительная картина распределения количества действующих стандартов и оцененного объема общей и содержательной частей информации по временным интервалам, выраженного в процентах

Fig. 3. Comparison between the distribution of the number of the current standards and the estimated amount of general and content-related parts of information by the time intervals expressed as a percentage

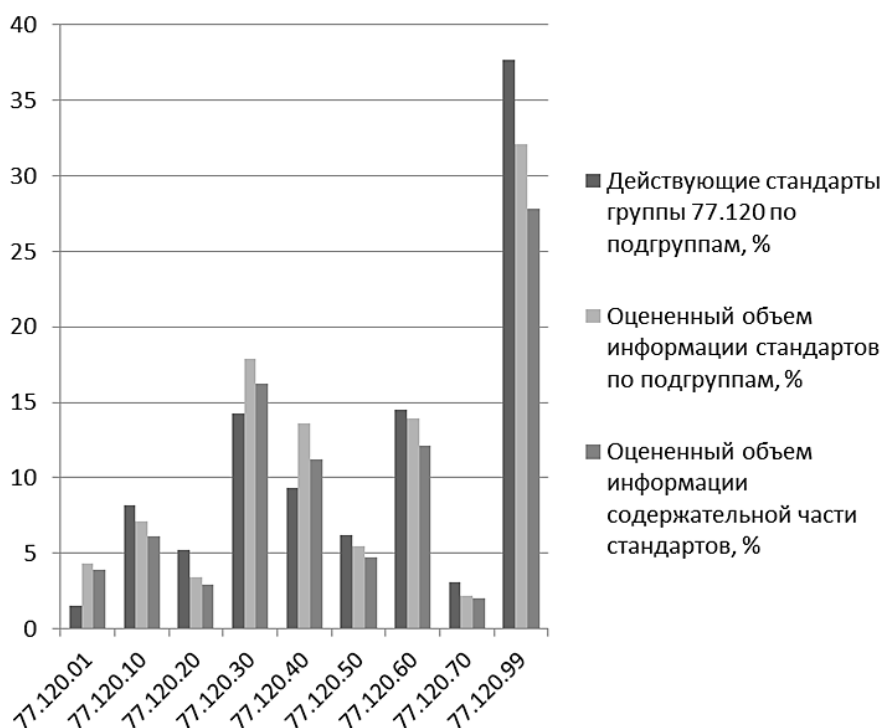


Рис. 4. Сравнительная картина распределения количества действующих стандартов и оцененного объема общей и содержательной частей информации в стандартах

Fig. 4. Comparison between the distribution of the number of the current standards and the estimated amount of general and content-related parts of information in the standards

Заключение

1. В современных условиях цифровой трансформации стандарты как источник достоверной, объективной информации приобретают особое значение и для успешного присоединения этих сведений к различным информационным системам необходимо получить представление о размере информации, содержащейся в стандартах.

2. Для определения размера информации в действующих стандартах были использованы стандарты группы 77.120 Цветные металлы в соответствии с общероссийским классификатором стандартов ОКС (ОК001-2021(ИСС МКС)).

3. В процессе исследования был использован алфавитный подход к оценке размера информации и стратифицированная выборка по классификационным подгруппам стандартов группы 77.120.

4. Для определения размера информации в стандарте было введено следующее определение: *оцененный объем информации в стандарте – это произведение суммарного количества символов K, содержащихся в стандарте, на информационный вес символа в выбранной кодировке UNI CODE (UTF-8).*

5. В процессе исследования было установлено для временных интервалов 1970-1979 и 1980-1989 гг. оцененный объем информации на 6-8% меньше, чем количество действующих стандартов, принятых в указанные временные интервалы. Для временного интервала 2010-2019 гг. картина обратная: оцененный объем информации в данный период ~ на 12% больше, чем количество стандартов.

Данные, полученные по отдельным подгруппам и временным интервалам, позволяют сделать вывод, что стандарты, принятые после 2010 г., как правило, имеют значительно больший оцененный объем информации.

Список источников

1. Лопатников Л.И. Экономико-математический словарь: Словарь современной экономической науки / Акад. нар. хоз-ва при Правительстве РФ; под ред. Г.Б. Клейнера. 5-е изд., перераб. и доп.: М.: Дело, 2003. 519 с.
2. Большой экономический словарь: более 20000 терминов и определений [Электронный ресурс] / авт. и сост. А.Б. Борисов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Книжный мир, 2010. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM); 12 см. (Электронные справочники и энциклопедии). ISBN 978-5-8041-0437-6.
3. Конт-Спонвиль Андре. Философский словарь. М.: Этерна, 2012. 750 с.

4. Ожегов С.И., Шведова Н.Ю. Толковый словарь русского языка: 72500 слов и 7500 фразеологических выражений. М.: Азъ, 1994. 907 с.
5. Винер Н. Кибернетика. М.: Наука, 1968. 201 с.
6. Белобрагин В.Я., Зажигалкин А.В., Зворыкина Т.И. Техническое регулирование на рубеже индустрии 4.0. М.: Научный консультант, 2019. 100 с.
7. Казанцева Н., Ткачук Г., Казанцева Т. Стандартизация в эпоху информационно-цифровой революции // Стандарты и качество. 2020. №2. С. 30-34.
8. The Necessity and Complexity of Standardization / T.V. Kazantseva, N.K.Kazantseva, G.A.Thachuk, A.L.Nevolina et al. // Wseas Transactions and Control. Vol. 15, 2020, pp. 568-575.
9. Зажигалкин А., Пугачев В., Петросян А. Цифровая экономика и будущее стандартизации // Стандарты и качество. 2017. № 9. С. 30-34.
10. Зажигалкин А., Пугачев В., Петросян А. Цифровая экономика и будущее стандартизации // Стандарты и качество. 2017. № 10. С. 23-27.
11. Гастев А. Стандартизация как наука // Вестник стандартизации. 1935. №1 (61). С. 5-9.
12. Брод В.Ю., Бунин Г.П. Формирование методологии стандартизации // Стандарты и качество. 2012. №2. С. 56-58.
13. Казанцева Т.В., Казанцева Н.К., Полякова М.А. Предпосылки создания электронной библиотеки стандартов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 80-й международной научно-технической конференции. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2022. Т.1. С. 199.
14. Казанцева Т.В., Казанцева Н.К., Полякова М.А. Разработка подхода для цифровизации стандартов на метизную продукцию // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 80-й международной научно-технической конференции. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2022. Т.1. С. 219-220.
15. Казанцева Н.К., Ткачук Г.А., Казанцева Т.В. Что необходимо изменить в системе управления стандартами // Стандарты и качество. 2020. № 6. С. 14-18.
16. Полякова М.А., Казанцева Т.В., Казанцева Н.К. Система регламентации свойств металлопродукции в стандартах как база данных // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 79-й международной научно-технической конференции. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2021. Т.1. С. 195.
17. К вопросу о проблемах использования ссылочных стандартов / Дрягун Э.П., Полякова М.А., Белан О.А., Алсынбаев Н.Т. // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2019. Т. 75. №10. С. 1169-1180.
18. Лебедев Е.Г. Математические основы передачи информации: учеб. пособие для вузов. Ч. 5. СПб.: СПбГУИТ-МО, 2010. 93 с.

19. Информатика / В.Н. Литвинов, Н.Н. Грачева, Н.Б. Руденко, О.Ю. Каун. Зерноград: Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВПО «Донской государственный аграрный университет», 2019. 206 с.
20. Аджемов А.С., Хромой Б.П. Измерение количества информации // Мобильный бизнес: перспективы развития и реализации систем радиосвязи в России и за рубежом: сб. матер. XXXIII междунар. конф. РАЕН, Республика Индонезия, Лангкави, 15-17 апреля 2013 года. Лангкави: ЗАО «Национальный институт радио и инфокоммуникационных технологий», 2013. С. 42-49.
21. Шавенько Н.К. Основы теории информации и кодирования: учеб. пособие. М.: Изд-во МИИГАиК, 2012. 125 с.
22. Комплекс задач при создании электронной библиотеки стандартов / Казанцева Т.В., Полякова М.А., Казанцева Н.К., Ткачук Г.А., Александров В.А. // Качество и жизнь. 2021. № 4. С. 42-46.
23. Пиджакова Е., Казанцева Т. Оценка размера информации в стандартах // Роль технического регулирования и стандартизации в эпоху цифровой экономики: сб. ст. участников III международной научно-практической конференции молодых ученых, Екатеринбург, 25 ноября 2021 г. / ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». Екатеринбург: Издательский дом «Ажур», 2021. С. 83-85. URL: <https://elar.urfu.ru/handle/10995/107525>
24. Количественная оценка информации как основа построения базы данных / М.А. Полякова, Т.В. Казанцева, Н.К. Казанцева, Е.Н. Пиджакова // Черная металлургия. 2022. Т. 78. №4. С. 338-344.
25. Тиссенко О. Стандартизация требует научного подхода // Стандарты и качество. 2012. №2. С. 46-48.
5. Viner N. *Kibernetika* [Cybernetics]. Moscow: Nauka, 1968, 201 p. (In Russ.)
6. Belobragin V.Ya., Zazhigalkin A.V., Zvorykina T.I. *Tekhnicheskoe regulirovanie na rubezhe industrii 4.0* [Technical regulation at the turn of Industry 4.0]. Moscow: Nauchny konsultant, 2019, 100 p. (In Russ.)
7. Kazantseva N., Tkachuk G., Kazantseva T. Standardization in the time of the information and digital revolution. *Standarty i kachestvo* [Standards and Quality], 2020, no. 2, pp. 30-34. (In Russ.)
8. Kazantseva T.V., Kazantseva N.K., Tkachuk G.A., Nevolina A.L. et al. The necessity and complexity of standardization. *WSEAS Transactions on Systems and Control*, 2020, 15, 568-575.
9. Zazhigalkin A., Pugachev V., Petrosyan A. Digital economy and future of standardization. *Standarty i kachestvo* [Standards and Quality], 2017, no. 9, pp. 30-34. (In Russ.)
10. Zazhigalkin A., Pugachev V., Petrosyan A. Digital economy and future of standardization. *Standarty i kachestvo* [Standards and Quality], 2017, no. 10, pp. 23-27. (In Russ.)
11. Gastev A. Standardization as science. *Vestnik standartizatsii* [Vestnik of Standardization], 1935, no. 1 (61), pp. 5-9. (In Russ.)
12. Brod V.Yu., Bunin G.P. Drawing up of the standardization methodology. *Standarty i kachestvo* [Standards and Quality], 2012, no. 2, pp. 56-58. (In Russ.)
13. Kazantseva T.V., Kazantseva N.K., Polyakova M.A. Background for forming an electronic library of standards. *Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya: tezisy dokladov 80-y mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Currently relevant issues of contemporary science, engineering and education: abstracts of reports presented at the 80th International Scientific and Technical Conference]. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2022, vol. 1, p. 199. (In Russ.)
14. Kazantseva T.V., Kazantseva N.K., Polyakova M.A. Developing an approach for digitalization of standards for metalware. *Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya: tezisy dokladov 80-y mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Currently relevant issues of contemporary science, engineering and education: abstracts of reports presented at the 80th International Scientific and Technical Conference]. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2022, vol. 1, p. 219-220. (In Russ.)
15. Kazantseva N.K., Tkachuk G.A., Kazantseva T.V. What to be changed in the standard management system. *Standarty i kachestvo* [Standards and Quality], 2020, no. 6, pp. 14-18. (In Russ.)
16. Polyakova M.A., Kazantseva T.V., Kazantseva N.K. A system for regulating properties of steel products in standards as a database. *Aktualnye problemy sov-*

References

1. Lopatnikov L.I. *Ekonomiko-matematicheskii slovar: Slovar sovremennoy ekonomicheskoy nauki* [Dictionary of economics and mathematics: Dictionary of modern economics]. Academy of National Economy under the Government of the Russian Federation. 5th ed. (updated and revised). Moscow: Delo, 2003, 520 p. (In Russ.)
2. Borisov A.B. *Bolshoy ekonomicheskii slovar: bolee 20000 terminov i opredeleniy* [Unabridged dictionary of economics: over 20,000 terms and definitions]. Moscow: Knizhny mir, 2010, 1 CD-ROM. ISBN 978-5-8041-0437-6. (In Russ.)
3. Comte-Sponville André. *Filosofskiy slovar* [Dictionary of philosophy]. Moscow: Eterna, 2012, 750 p. (In Russ.)
4. Ozhegov S.I., Shvedova N.Yu. *Tolkovy slovar russkogo yazyka: 72500 slov i 7500 frazeologicheskikh vyrazheniy* [Explanatory dictionary of the Russian language: 72,500 words and 7,500 phraseological units]. Moscow: Az, 1994, 907 p. (In Russ.)

- remennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya: tezisy dokladov 79-y mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Currently relevant issues of contemporary science, engineering and education: abstracts of reports presented at the 79th International Scientific and Technical Conference]. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2021, vol. 1, p. 195. (In Russ.)
17. Dryagin E.P., Polyakova M.A., Belan O.A., Alsynbaev N.T. Problems with using reference standards. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii* [Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information], 2019, vol. 75, no. 10, pp. 1169-1180. (In Russ.)
 18. Lebedko E.G. *Matematicheskie osnovy peredachi informatsii. Ch. 5: ucheb. posobie dlya vuzov* [Mathematical principles of information transfer. Part 5: study guide for universities]. Saint Petersburg: Saint Petersburg State ITMO University, 2010, 93 p. (In Russ.)
 19. Litvinov V.N., Gracheva N.N., Rudenko N.B., Kaun O.Yu. *Informatika* [Information science]. Zernograd: Azov-Black Sea Engineering Institute of Don State Agrarian University, 2019, 206 p. (In Russ.)
 20. Adzhemov A.S., Khromoy B.P. Measuring the quantity of information. *Mobilny biznes: perspektivy razvitiya i realizatsii sistem radiosvyazi v Rossii i za rubezhom: sb. mater. XXXIII mezhdunar. konf. RAEN* [Mobile business: prospects for development and implementation of radiocommunication systems in Russia and abroad: collection of papers of the 33rd International Conference of the Russian Academy of Natural Sciences]. Indonesia, Langkawi, 15-17 April 2013. Indonesia, Langkawi: CJSC National Institute of Radio and Infocommunication Technologies, 2013, pp. 42-49. (In Russ.)
 21. Shavenko N.K. *Osnovy teorii informatsii i kodirovaniya: ucheb. posobie* [Basics of the theory of information and coding: study guide]. Moscow: Publishing House of Moscow State University of Geodesy and Cartography, 2012, 125 p. (In Russ.)
 22. Kazantseva T.V., Polyakova M.A., Kazantseva N.K., Tkachuk G.A., Aleksandrov V.A. A range of objectives, when forming an electronic library of standards. *Kachestvo i zhizn* [Quality and Life], 2021, no. 4, pp. 42-46. (In Russ.)
 23. Pidzhakova E., Kazantseva T. Assessing the size of information in standards. *Rol tekhnicheskogo regulirovaniya i standartizatsii v epokhu tsifrovoy ekonomiki: sb. st. uchastnikov III mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh* [The role of technical regulation and standardization in the time of digital economy: collection of papers prepared by participants of the 3rd International Scientific and Practical Conference of Young Scientists]. Yekaterinburg, 25 November 2021, Ural Federal University. Yekaterinburg: Azhur Publishing House, 2021, pp. 83-85. Available at: <https://elar.urfu.ru/handle/10995/107525>
 24. Polyakova M.A., Kazantseva T.V., Kazantseva N.K., Pidzhakova E.N. Quantitative assessment of information as a basis for building a database. *Chernaya metallurgiya* [Ferrous Metallurgy], 2022, vol. 78, no. 4, pp. 338-344. (In Russ.)
 25. Tissenko O. Standardization needs a scientific approach. *Standarty i kachestvo* [Standards and Quality], 2012, no. 2, pp. 46-48. (In Russ.)

Поступила 25.10.2022; принята к публикации 27.10.2022; опубликована 22.12.2022
Submitted 25/10/2022; revised 27/10/2022; published 22/12/2022

Казанцева Татьяна Владимировна – старший преподаватель, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия.
Email: t.v.kazantseva@urfu.ru. ORCID 0000-0001-7051-614X

Казанцева Надежда Константиновна – кандидат технических наук, доцент, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия.
Email: n.k.kazantseva@urfu.ru. ORCID 0000-0001-9430-9604

Полякова Марина Андреевна – доктор технических наук, доцент, Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: m.polyakova-64@mail.ru. ORCID 0000-0002-1597-8867

Пиджакова Екатерина Николаевна – студент магистратуры, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия.
Email: katya.pen2204@mail.ru.

Александров Виктор Алексеевич – кандидат технических наук, доцент, Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия.
Email: alexandrov_vikt@mail.ru. ORCID 0000-0001-6637-7917

Tatiana V. Kazantseva – Senior Lecturer, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia.
Email: t.v.kazantseva@urfu.ru. ORCID 0000-0001-7051-614X

Nadezhda K. Kazantseva – PhD (Eng.), Associate Professor, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia.
Email: n.k.kazantseva@urfu.ru. ORCID 0000-0001-9430-9604

Marina A. Polyakova – DrSc (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: m.polyakova-64@mail.ru. ORCID 0000-0002-1597-8867

Ekaterina N. Pidzhakova – master degree student, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia.
Email: katya.pen2204@mail.ru.

Viktor A. Aleksandrov – PhD (Eng.), Associate Professor, Ural State Agrarian University, Yekaterinburg, Russia.
Email: alexandrov_vikt@mail.ru. ORCID 0000-0001-6637-7917

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.77
DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-4-95-101



РАЗРАБОТКА НОВОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА МЕТАЛЛОПРОКАТА ДЛЯ ЭМАЛИРОВАНИЯ И МЕТОДИКИ ЕГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Голубчик Э.М., Чикишев Д.Н.

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

Аннотация. Современный рынок материалов диктует необходимость поддержания устойчивого баланса интересов производителей и потребителей. Это особенно актуально при освоении процессов производства изделий, обладающих повышенным уровнем потребительских свойств. Одним из высокорентабельных видов холоднокатаной металлопродукции является прокат, производимый для эмалирования из стали марки 08ЮР. Требования потребителей к такой продукции предусматривают исключение появления дефекта «рыбья чешуя» в готовом эмалированном изделии. В отечественной практике для оценки вероятности появления данного дефекта применяется показатель водородного охрупчивания, который регламентируется нормативными документами. В то же время существующий показатель оценки качества металлопроката не в полной мере характеризует склонность проката к возникновению дефекта «рыбья чешуя», что связано с особенностями методики его определения, в том числе из-за влияния человеческого фактора. Учеными ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» (ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова») совместно со специалистами ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ПАО «ММК») был предложен новый показатель качества металлопроката для эмалирования – объемная доля структурно-свободного цементита, который позволяет оценить склонность проката к образованию «рыбьей чешуи», а также была разработана методика его определения. Разработанный показатель позволяет однозначно судить о склонности металлопроката к наводороживанию и в полной мере коррелирует со значениями показателя водородного охрупчивания. Определены границы значений данного показателя, исключающие формирование дефекта в эмалированном изделии. На основе разработанной методики были выявлены коренные причины появления дефекта «рыбья чешуя» и определены пути его минимизации в технологии производства проката для эмалирования. В частности, при организации процесса горячей прокатки предложены новые технологические решения по охлаждению поверхности металла на отводящем рольганге стана горячей прокатки. Разработанная новая сквозная технология производства металлопроката из стали марки 08ЮР обеспечивает выход годной продукции на уровне 99,8%.

Ключевые слова: холоднокатаный металлопрокат, эмалирование, микроструктура, свойства, наводороживание, качество

© Голубчик Э.М., Чикишев Д.Н., 2022

Для цитирования

Голубчик Э.М., Чикишев Д.Н. Разработка нового показателя оценки качества металлопроката для эмалирования и методики его определения. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №4. С. 95-101. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-95-101>



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

DEVELOPMENT OF A NEW INDICATOR FOR ASSESSING THE QUALITY OF ROLLED STEEL PRODUCTS FOR ENAMELING AND METHODS FOR ITS DETERMINATION

Golubchik E.M., Chikishev D.N.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. The current materials market dictates the need for maintaining an acceptable balance of interests between producers and consumers. This is especially true when mastering the production processes of products with an increased level of consumer properties. One of the highly profitable types of cold-rolled steel products is rolled products for enameling from 08YuR steel grade (as per the Russian Standard). Consumer requirements for such products provide for the exclusion of a “fish scale” defect in the finished enameled product. In Russian practice, to assess the probability of this defect, the hydrogen embrittlement (HE) index is used as stated in the regulatory documents. At the same time, the existing quality assessment indicator for rolled steel products does not fully characterize the tendency of rolled products to develop the “fish scale” defect, which is attributed to the peculiarities of the methods for its determination, including the influence of the human factor. Scientists of Nosov Magnitogorsk State Technical University (NMSTU) and specialists of PJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works (PJSC MMK) proposed a new indicator of the quality of rolled steel products for enameling, namely the volume fraction of structurally free cementite, to assess the tendency of rolled products to cause “fish scales”, and developed the methods for its determination. The developed indicator contributes to forming a clear opinion on the tendency of rolled steel products to hydrogen trapping and fully correlates with the hydrogen embrittlement values. The authors determined the threshold range of such values, excluding the defect in the enameled product. The developed methodology served as a basis for identifying root causes for the “fish scale” defect and ways to minimize it, when manufacturing rolled products for enameling. In particular, when organizing the hot rolling process, new technological solutions were proposed for cooling the steel surface on the discharge roller table of a hot rolling mill. The developed new end-to-end technology for rolled steel products from 08YuR steel grade (as per the Russian Standard) ensures the yield of 99.8%.

Keywords: cold rolled steel products, enameling, microstructure, properties, hydrogen trapping, quality

For citation

Golubchik E.M., Chikishev D.N. Development of a New Indicator for Assessing the Quality of Rolled Steel Products for Enameling and Methods for Its Determination. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 4, pp. 95-101. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-95-101>

Введение

В условиях нестабильной экономической ситуации в мире, с учетом наметившегося переизбытка товарной продукции, существенным двигателем дальнейшего развития конкурентных преимуществ производителей становится возможность последних оперативно и адекватно реагировать на настроения рынка. Причем в последние годы при постоянно изменяющейся конъюнктуре потребительского рынка наиболее приемлемой для развития производства, в частности в металлургии, и повышения эффективности при проведении различного рода реконструкций либо модернизаций предприятий становится концепция освоения «глобального рынка» сбыта собственной продукции. В связи с этим на первый план выступают два аспекта современного промышленного металлургического

производства. Во-первых, необходимость обеспечивать и поддерживать стабильно высокие показатели качества сортамента, имеющего в том числе эксклюзивный характер, а также возможность управления данными показателями на всех стадиях производственного цикла металлопродукции. Во-вторых, способность предприятия достаточно оперативно адаптироваться к внешним воздействиям без снижения эффективности и результативности производства. При этом производителям приходится учитывать требования, которые зачастую не всегда пересекаются у разных потребителей на один и тот же вид продукции. Одним из достаточно востребованных видов является металлопрокат для эмалирования. Наибольшее распространение для изготовления эмалированных изделий в нашей стране получила марка стали 08ЮР, которая широко применяется для производства посуды,

сантехники, газовых плит и т.п. Наиболее актуальной проблемой для производства такого вида продукции остается появление в готовом эмалированном изделии дефекта «рыбья чешуя».

Дефект «рыбья чешуя», по мнению зарубежных и отечественных исследователей, образуется на эмалированном изделии в результате откола эмали и вызван выделением водорода из металла [1-10]. Для оценки склонности металла к наводороживанию в отечественной практике используется показатель водородного охрупчивания (ПВО). Методика его определения и пороговые значения нормируются ГОСТ 24244-2018 и, например, ТУ 14-101-321-2008 (ПАО «ММК»). При этом в соответствии с ГОСТ 24244-2018 значение показателя менее 40% считается неудовлетворительным. Таким образом, чем ниже значение ПВО, тем выше вероятность появления дефекта в готовом эмалированном изделии. В имеющемся же европейском стандарте EN 10209 установлены требования на методы испытания устойчивости к образованию «чешуйчатой окалины», потери массы при травлении и сцепления эмалированного покрытия с металлической подложкой. Современные методики определения склонности проката к наводороживанию поверхности достаточно сложны, при этом результаты испытаний не всегда позволяют однозначно судить о последующей вероятности образования дефекта в готовом эмалированном изделии. В условиях массового производства отечественные методики оценки ПВО на разных предприятиях как производителей, так и потребителей имеют значительные недостатки – различное оборудование для однородных испытаний, разные нейтрализаторы загрязнений поверхности при подготовке к испытаниям, существенное влияние человеческого фактора. Следует отметить, что производители проката для эмалирования оценивают параметр ПВО, как правило, на готовом рулонном прокате на концевых участках полосы. При этом, как показали комплексные исследования, проведенные учеными ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», распределение значений ПВО по длине и ширине холоднокатаной полосы может носить нестабильный характер и существенно отличаться друг от друга. Это приводит к тому, что проба металлопроката, выдержавшая испытание по значению ПВО у производителя, не всегда гарантирует потребителю вероятность отсутствия появления дефекта «рыбья чешуя» в готовом эмалированном изделии, полученном из данной полосы, так как распределение ПВО по площади полосы в рулоне может носить

случайный характер. Таким образом, возникает необходимость, во-первых, разработки показателя, однозначно характеризующего склонность металлопроката к наводороживанию, во-вторых, разработки инженерной методики его определения в условиях массового производства и, в-третьих, технологии адаптивного оперативного управления таким показателем.

Материалы и методы исследования

Как известно, для снижения водородного охрупчивания металлопроката для эмалирования необходимо применение «ловушек» водорода [5]. Как показал обзор отечественной и зарубежной литературы [1-5], для этого в металлургической практике применяются разные методы. В частности, на отечественных металлургических заводах применяют специальное микролегирование, например бором (в пределах 0,001-0,003%), кроме того, в низкоуглеродистых сталях наряду с ферритом возможно получение дополнительных фаз, увеличение границ зерен в микроструктуре проката и т.д.

Учеными ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» был разработан и предложен новый показатель оценки склонности металлопроката для эмалирования к образованию дефекта «рыбья чешуя» – объемная доля структурно-свободного цементита в микроструктуре проката. Проведенные многочисленные комплексные исследования совместно со специалистами ПАО «ММК» на холоднокатаном металлопрокате из стали марки 08ЮР позволили выявить факт, что для выполнения требования по отсутствию дефекта «рыбья чешуя» и обеспечения значений ПВО более 40% значения объёмной доли цементитных частиц должны составлять более 2,7%. Испытание считается не удовлетворительным, если значение менее 2,4-2,6%. При этом сформированная устойчивая карбидная (цементитная) сетка при указанных значениях содержания карбидных (цементитных) частиц в структуре может выступать в качестве устойчивой ловушки водорода в металлопрокате под эмалирование, что, соответственно, исключает (минимизирует) возможность образования дефекта «рыбья чешуя». Образцы, имеющие удовлетворительные значения показателя склонности стали к наводороживанию, имеют явное строчечное расположение структурно-свободного цементита, представляющего одно- или двухслойные цепочки. В микроструктуре образцов, не прошедших испытание на склонность стали к наводороживанию, наблюдается точечная (глобуляр-

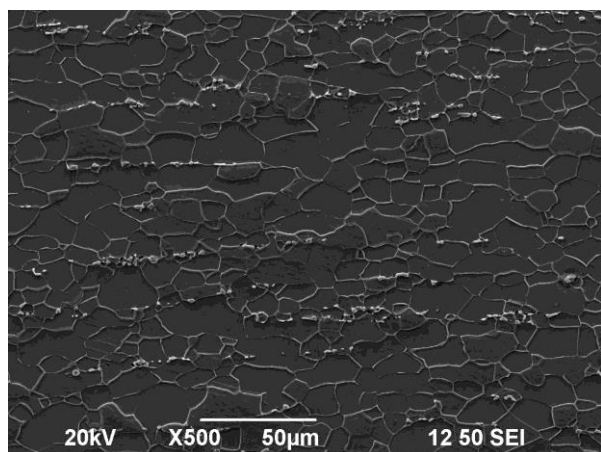
ная) сыпь из цементитных частиц, равномерно или неравномерно распределённых по площади шлифа и имеющих только тенденцию к образованию однослойных цепочек с общей ориентацией в направлении деформации. Частицы цементита могут иметь неравноосную форму и равномерно располагаться в объёме зёрен и на их стыках. Объёмная доля таких частиц, как правило, не превышает 1%. Все образцы с неудовлетворительными значениями показателя склонности стали к наводороживанию имеют в своей структуре цементит нулевого балла различных рядов шкалы 1 по ГОСТ 5640-68.

Пример определения объёмной доли структурно-свободного цементита в микроструктуре стали марки 08ЮР приведен на **рис. 1**. Примеры микроструктуры с удовлетворительными и неудовлетворительными значениями объёмной доли цементита представлены на **рис. 2**.

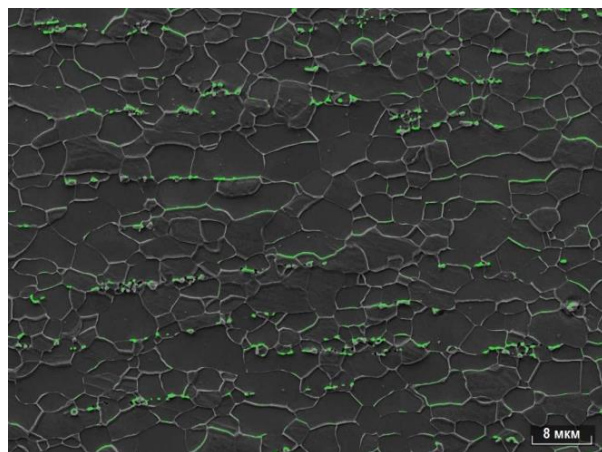
Разработанная методика оценки объёмной доли структурно-свободного цементита в микроструктуре металлопроката из стали марки 08ЮР включает в себя следующие этапы: отбор проб и подготовка шлифов холоднокатаного проката по стандартной методике (ГОСТ 5640-68); травление образцов в 4%-м растворе азотной кислоты в этиловом спирте методом погружения; электронно-микроскопическое исследование образцов с использованием растрового (сканирующего) микроскопа при увеличениях $\times 500$ -1000 крат

для оценки размера зерна феррита и объёмной доли структурно-свободного цементита; ввод растровых электронно-микроскопических (РЭМ) изображений в программную среду Thixomet PRO с возможной калибровкой изображений; последующий количественный анализ объёмной доли структурно-свободного цементита на РЭМ-фотографиях (осуществляется в автоматическом режиме); соответствующая статистическая обработка полученных результатов. Исследования проводились с применением растрового (сканирующего) электронного микроскопа JSM-6490LVJEOL [11, 12].

Таким образом, в ходе проведения исследований был выявлен фактор (наличие определенной доли структурно-свободного цементита), который, с одной стороны, может обеспечить формирование равномерной микроструктуры по всему объёму (а соответственно, и площади) металлопроката, что позволяет обеспечить стабильность показателя наводороживания, а с другой – является достаточно легко управляемым в технологическом процессе. Анализ сквозной технологии производства металлопроката для эмалирования в условиях ПАО «ММК» показал, что цементитная сетка формируется при горячей прокатке на широкополосном стане. Для условий ПАО «ММК» – это станы 2000 и 2500 горячей прокатки, имеющие специфические отличия по составу оборудования.



а



б

Рис. 1. Пример определения объёмной доли структурно-свободного цементита в микроструктуре стали 08ЮР в среде программного продукта Thixomet PRO: а – исходное РЭМ-изображение; б – РЭМ-изображение после обработки в среде программного продукта Thixomet PRO в автоматическом режиме путем выделения области существования структурно-свободного цементита

Fig. 1. An example of determining the volume fraction of structurally free cementite in the microstructure of steel grade 08YuR in Thixomet PRO: а is an original SEM image; б is a SEM image after processing in Thixomet PRO in an automatic mode by specifying a zone of structurally free cementite

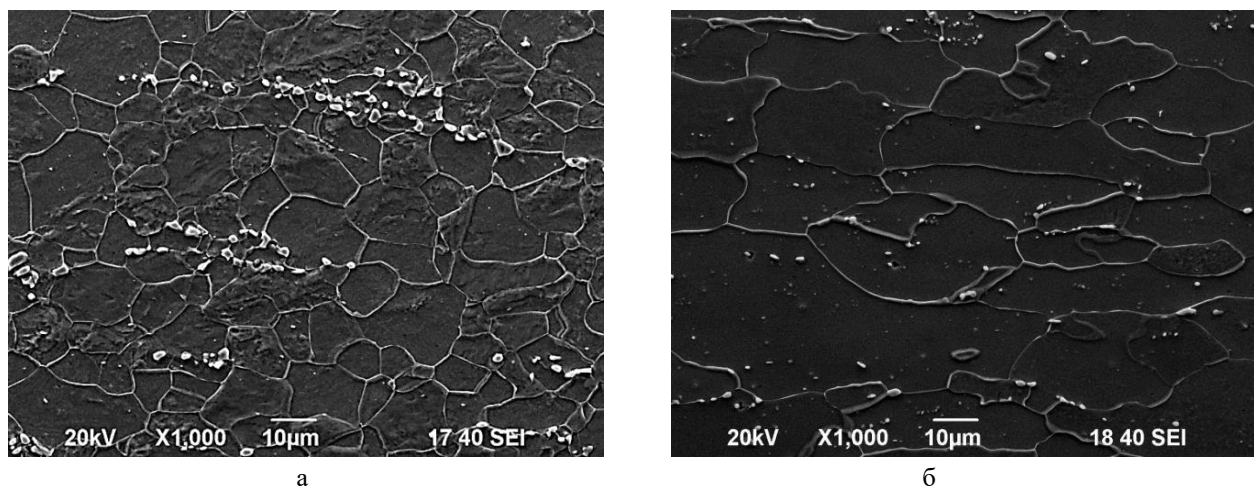


Рис. 2. Примеры микроструктуры стали 08ЮР с удовлетворительными и неудовлетворительными значениями объемной доли цементита: а – микроструктура проката со значением объёмной доли структурно-свободного цементита 3,22% (удовлетворительно, ПВО 65%); б – микроструктура проката со значением объёмной доли структурно-свободного цементита 1,57% (неудовлетворительно, ПВО 27%)

Fig. 2. Examples of the microstructure of steel grade 08YuR, showing satisfactory and unsatisfactory values of the volume fraction of cementite: a is a microstructure of rolled products with a volume fraction of structurally free cementite of 3.22% (satisfactory, hydrogen embrittlement index of 65%); б is a microstructure of rolled products with a volume fraction of structurally free cementite of 1.57% (unsatisfactory, hydrogen embrittlement index of 27%)

Как показали многолетние исследования, наиболее значимыми параметрами технологии горячей прокатки металлопроката под эмалирование, обеспечивающими стабильность микроструктуры и свойств являются температура конца горячей прокатки в интервале 860-890°C и температура смотки в диапазоне 730-750°C. Однако, как оказалось, регламентирование только этих параметров не гарантирует обеспечение высоких значений объемной доли цементита в микроструктуре стали 08ЮР. При этом необходима еще оперативная технологическая адаптация к условиям конкретного стана горячей прокатки скоростных условий прокатки в последней катающей клетки и условий охлаждения на отводящем рольганге стана с регламентацией схем подачи охладителя (воды) на верхнюю и нижнюю поверхности полосы. При этом следует минимизировать охлаждение полосы водой в начальной стадии охлаждения.

Полученные результаты и их обсуждение

Результаты корреляции значений ПВО и значений объемной доли структурно-свободного цементита в ходе проведенных комплексных исследований металлопроката для эмалирования из стали марки 08ЮР, включающие отбор проб как по длине, так и по ширине холоднокатаных ру-

лонов, прокатанных по различным схемам горячей прокатки, представлены в **таблице**.

Таблица. Результаты исследований образцов холоднокатаного металлопроката из стали марки 08ЮР

Table. Tests of the samples of cold rolled steel products from steel grade 08YuR

Номер образца	Склонность к охрупчиванию (ПВО), %	Объемная доля структурно-свободного цементита, %	Балл феррита
1	22,7	2,17	9, 10
2	14	1,38	10
3	12,3	1,76	10
4	36,9	1,2	9, 10
5	63,7	3,33	10
6	50	3,29	10
7	57,8	3,26	9, 10
8	40,2	2,75	10
9	48,2	3,22	9

Анализ результатов исследований показал, что при значениях объемной доли цементита в микроструктуре холоднокатаного проката равных и более 2,7% показатель водородного охрупчивания соответствует нормативным документам. При этом у потребителей-производителей эмалированных изделий не наблюдается дефекта «рыбья

чешуя» в готовых изделиях. Разработанная технология адаптивного управления параметрами горячей прокатки металлопроката из стали 08ЮР позволила обеспечить выход годной продукции по показателю водородного охрупчивания в ПАО «ММК» на уровне практически 100%.

Заключение

Таким образом, разработан новый показатель металлопроката из низкоуглеродистой стали под эмалирование, однозначно определяющий склонность проката к образованию дефекта «рыбья чешуя», и методика его определения. Определен диапазон значений показателя объемной доли цементита, обеспечивающий получение металлопроката с нормируемыми стандартами величины показателя водородного охрупчивания. Исследованы возможности адаптивного управления формированием данного показателя на стадии горячей прокатки в условиях широкополосного стана.

Список источников

1. New approaches in understanding the effects of hydrogen trapping and the fishscaling resistance of enameled steels / Y. Lin, L. Chiang, Y. Lin, H. Yen // *Surface and Coatings Technology*, 2020, 399, p. 126-135.
2. Influence of boron addition on microstructure and properties of a low-carbon cold rolled enamel steel / Y. Zhao, X. Huang, B. Yu, L. Chen, X. Liu // *Procedia Engineering*, 2017, 207, pp. 1833-1838.
3. Effect of coiling temperature on microstructure, properties and resistance to fish-scaling of hot rolled enamel steel / Y. Zhao, X. Huang, B. Yu, X. Yuan, X. Liu // *Materials*, 2017, 10, p. 1012.
4. An ultra-low-carbon steel with outstanding fish-scaling resistance and cold formability for enameling applications / Z. Liu, W. Li, X. Shao, Y. Kang, Y. Li // *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2019, 50, pp. 1805-1815.
5. Петцольд А., Пешманн Г. Эмаль и эмалирование. Справ. изд. М.: Металлургия, 1990. 576 с.
6. Bragina L. Glass Ceramic Coatings for Ferrous Metals Protection // *Proc. of 20th Intern. Enamellers Congr.*, 15-19 May, 2005, Istanbul. P. 23-34.
7. Эмалировочное производство / Лазуткина О.Р., Казак А.К., Диденко В.В., Мiroва Т.В. Екатеринбург: УрФУ, 2010. 127 с.
8. Pagliuca S., Faust W.D., Porcelain (Vitreous) Enamels and Industrial Enamelling Processes. Mantova: Tipografia Commerciale, 2011. 900 p.
9. Variations of microstructure and resistance to fish-scaling of a hot rolled enamel steel before and after enamel firing / X. Huang, Z. Zhang, X. Liu, Y. Zhao, X. Li // *Journal of Materials Research and Technology*, 11 (2021), pp. 466-473.
10. Hydrogen diffusion and trapping in Ti-modified advanced high strength steels / N. Winzer, O. Rott, R. Thiessen, I. Thomas, K. Mraczek, T. Höche, et al. // *Materials and Design*, 92 (2016), pp. 450-461.
11. Исследование особенностей микроструктуры образцов проката из стали марки 08ЮР с оценкой ее влияния на наводороживание для определения склонности к образованию дефекта «рыбья чешуя» на эмалированном прокате / Д.Н. Чикишев, Э.М. Голубчик, А.А. Авраменко, О.А. Никитенко, Д.М. Потапцев, М.Ю. Фомин, С.С. Стругов // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия»*. 2021. Т. 21, № 3. С. 31-39.
12. Реализация новых подходов к производству высококачественного металлопроката для эмалирования / Д.Н. Чикишев, Э.М. Голубчик, О.А. Никитенко, Е.Н. Ширяева, Т.В. Коляда // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2022. Т. 78. № 1. С. 46-52.

References

1. Lin Y., Chiang L., Lin Y., Yen H. New approaches in understanding the effects of hydrogen trapping and the fishscaling resistance of enameled steels. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 399, 126-135.
2. Zhao Y., Huang X., Yu B., Chen L., Liu X. Influence of boron addition on microstructure and properties of a low-carbon cold rolled enamel steel. *Procedia Engineering*, 2017, 207, 1833-1838.
3. Zhao Y., Huang X., Yu B., Yuan X., Liu X. Effect of coiling temperature on microstructure, properties and resistance to fish-scaling of hot rolled enamel steel. *Materials*, 2017, 10, 1012.
4. Liu Z., Li W., Shao X., Kang Y., Li Y. An ultra-low-carbon steel with outstanding fish-scaling resistance and cold formability for enameling applications. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2019, 50, 1805-1815.
5. Petzold A., Poeschmann G. Emal i emalirovanie [Enamel and enameling]. Reference book. Moscow: Metallurgiya, 1990, 576 p. (In Russ.)
6. Bragina L. Glass ceramic coatings for ferrous metals protection. *Proc. of 20th Intern. Enamellers Congr.*, 15-19 May, 2005, Istanbul. pp. 23-34.
7. Lazutkina O.R., Kazak A.K., Didenko V.V., Mirova T.V. Emalirovochnoe proizvodstvo [Enameling facilities]. Yekaterinburg: Ural Federal University, 2010, 127 p. (In Russ.)
8. Pagliuca S., Faust W.D., Porcelain (vitreous) enamels and industrial enamelling processes. Mantova: Tipografia Commerciale, 2011, 900 p.
9. Huang X., Zhang Z., Liu X., Zhao Y., Li X. Variations of microstructure and resistance to fish-scaling of a hot rolled enamel steel before and after enamel firing. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 11, 466-473.
10. Winzer N., Rott O., Thiessen R., Thomas I., Mraczek K., Höche T., et al. Hydrogen diffusion and trapping

- in Ti-modified advanced high strength steels. *Materials and Design*, 2016, 92, 450-461.
11. Chikishev D.N., Golubchik E.M., Avramenko A.A., Nikitenko O.A., Potapsev D.M., Fomin M.Yu., Strugov S.S. Study on the microstructure of samples of rolled products from 08YuR steel grade and assessment of its effect on hydrogen trapping to determine the tendency to cause the “fish scale” defect on enameled rolled products. *Vestnik YuUrGU. Seriya Metallurgiya* [Bulletin of South Ural State University. Series: Metallurgy], 2021, vol. 21, no. 3, pp. 31-39. (In Russ.)
12. Chikishev D.N., Golubchik E.M., Nikitenko O.A., Shiryayeva E.N., Kolyada T.V. Implementation of new approaches to the production of high-quality rolled steel products for enameling. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii* [Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information], 2022, vol. 78, no. 1, pp. 46-52. (In Russ.)

Поступила 22.09.2022; принята к публикации 18.10.2022; опубликована 22.12.2022
Submitted 22/09/2022; revised 18/10/2022; published 22/12/2022

Голубчик Эдуард Михайлович – доктор технических наук, профессор,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: golub66@mail.ru. ORCID 0000-0003-3064-1311

Чикишев Денис Николаевич – доктор технических наук, профессор,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: d.chikishev@magtu.ru. ORCID 0000-0002-9402-4032

Eduard M. Golubchik – DrSc (Eng.), Professor
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: golub66@mail.ru. ORCID 0000-0003-3064-1311

Denis N. Chikishev – DrSc (Eng.), Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: d.chikishev@magtu.ru. ORCID 0000-0002-9402-4032

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

MODELLING OF METALLURGICAL PROCESSES

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.77.04
DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-4-102-109



АНАЛИЗ СХЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

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

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

Аннотация. Постановка задачи. Плоскостность толстолистного проката – один из важнейших показателей качества готовой продукции. При этом определяющую роль в обеспечении регламентируемых характеристик проката играет процесс охлаждения листа в роliko-закалочной машине. Повышение плоскостности термообработанного проката возможно за счет управления условиями теплообмена в процессе охлаждения и снижения градиента внутренних напряжений в металле. В связи с этим является актуальным анализ влияния следующих параметров процесса закалки на особенности теплообмена и уровень напряжений в металле: температура нагрева металла под закалку, температура охлаждающей воды, схема охлаждения, скорость перемещения и толщина проката. **Цель работы.** Исследование влияния схемы охлаждения на уровень напряжений, формируемых в толстолистовом прокате в процессе закалки. **Используемые методы.** Для достижения цели работы создана имитационная модель изменения теплового состояния металла в процессе охлаждения в роliko-закалочной машине стана 5000. В качестве метода исследования использовано конечно-элементное моделирование в DEFORM-3D. В разработанной модели учитывалось изменение температуры металла за счет охлаждения на воздухе (теплоотдача излучением и конвекцией) при транспортировке проката от нагревательной печи до первого коллектора, а также в промежутке между коллекторами и секциями. Кроме того, учитывалось, что в процессе охлаждения формируется три зоны контакта воды с металлом, характеризующиеся разными условиями теплоотдачи: область соударения потока воды с поверхностью листа, область малой интенсивности водяного потока, а также область пленочного кипения. Моделирование выполнено для четырех вариантов охлаждения, отличающихся общим расходом воды, а также распределением расхода воды по каждой из пяти зон роliko-закалочной машины. **Результаты.** Исследовано влияние схемы охлаждения на распределение температурных полей и уровень напряжений в металле, формируемых в поперечном сечении листового проката в процессе закалки.

Ключевые слова: листовой прокат, термическая обработка, закалка, конечно-элементное компьютерное моделирование, модель охлаждения, плоскостность

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, выполняемого с участием высшего учебного заведения (Соглашение № 075-11-2021-063 от 25.06.2021 г.).

© Полецков П.П., Алексеев Д.Ю., Кузнецова А.С., Гулин А.Е., Емалеева Д.Г., Адищев П.Г., 2022

Для цитирования

Анализ схем охлаждения листового проката на основе компьютерного моделирования / Полецков П.П., Алексеев Д.Ю., Кузнецова А.С., Гулин А.Е., Емалеева Д.Г., Адищев П.Г. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №4. С. 102-109. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-102-109>



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

ANALYSIS OF SIMULATED PLATE COOLING SCHEDULES

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

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Relevance. Plate flatness is one of the most important indicators of the quality of finished products. Yet a decisive role in ensuring the regulated characteristics of rolled products is attributed to plate cooling in a roller-quenching machine. An increase in flatness of heat-treated rolled products is possible by controlling the conditions of heat transfer during cooling and reducing the gradient of internal stresses in steel. In this regard, it is relevant to analyze the effect of the following quenching process parameters on the features of heat transfer and stresses in steel: temperature of heating steel for quenching, cooling water temperature, the cooling schedule, traveling speed and plate thickness. **Objective.** The aim of the research is to study the influence of cooling schedules on stresses formed in plates during the quenching process. **Methods Applied.** To achieve the aim of the research, a simulation model was created to show changes in the thermal state of steel during cooling in the roller-quenching machine of mill 5000. A research method was finite element modeling in DEFORM-3D. The developed model factors into changes in steel temperature due to air cooling (heat transfer by radiation and convection), when plates travel from the heating furnace to the first header and between headers and sections. In addition, it factors into three water-steel contact zones, which are characterized by different heat transfer conditions: the impact area of a water flow on the plate surface, the area of a low water flow rate, and the area of film boiling. The simulation was performed for four cooling options, which differ in the total water consumption as well as the distribution of water consumption for each of the five zones of the roller-quenching machine. **Results.** The influence of the cooling schedules on the distribution of temperature fields and stresses in steel formed in the cross section of plates during quenching was studied.

Keywords: plates, heat treatment, quenching, finite element modeling, cooling model, flatness

The study was carried out at Nosov Magnitogorsk State Technical University and funded by the Ministry of Education and Science of Russia as part of the integrated project aimed at developing high-tech production facilities and implemented with a higher educational institution (Agreement No. 075-11-2021-063 dated June 25, 2021).

For citation

Poletskov P.P., Alekseev D.Yu., Kuznetsova A.S., Gulin A.E., Emaleeva D.G., Adishchev P.G. Analysis of Simulated Plate Cooling Schedules. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 4, pp. 102-109. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-102-109>

Введение

Плоскостность толстолистного проката – один из важнейших показателей качества готовой продукции. При этом определяющую роль в обеспечении регламентируемых характеристик проката играет процесс охлаждения листа в ролико-закалочной машине (РЗМ). Закалка металла в РЗМ предусматривает охлаждение листов при его непрерывном перемещении между двумя рядами роликов (верхними и нижними), установленных с зазором. В условиях толстолистного стана 5000 закалочная машина поделена на 5 раздельно управляемых зон и включает 2 участка:

- участок интенсивного охлаждения (зоны высокого давления № 1-2);
- участок малоинтенсивного охлаждения (зоны низкого давления № 3-5).

Повышение плоскостности термообработанного проката возможно за счет управления условиями теплообмена в процессе охлаждения и снижения градиента внутренних напряжений в металле. В качестве основных параметров процесса закалки, влияющих на особенности тепло-

обмена и уровень напряжений в металле, могут выступать схема охлаждения, температура нагрева металла под закалку, температура охлаждающей воды, скорость перемещения металла через закалочную машину, толщина проката.

Таким образом, целью работы является исследование влияния схемы охлаждения (общего расхода воды и распределения расхода воды по зонам) на уровень напряжений, формируемых в толстолистовом прокате в процессе закалки.

Теория, материалы и методы исследования

Для достижения цели работы создана имитационная модель изменения теплового состояния металла в процессе охлаждения в РЗМ стана 5000 ПАО «ММК». В качестве метода исследования использовано конечно-элементное моделирование в программном комплексе DEFORM-3D [1-7].

В настоящее время существует ряд работ, посвященных анализу особенностей теплообмена и расчету параметров охлаждения на границе «среда-лист» [8-13]. В разработанной модели учитывалось изменение температуры металла за счет охлаждения на воздухе (теплоотдача излучением и конвек-

цией) при транспортировке проката от нагревательной печи до первого коллектора, а также в промежутке между коллекторами и секциями. Кроме того, учитывалось, что при падении водяного потока на поверхность движущегося листа формируется три области контакта воды с охлаждаемым металлом, характеризующиеся разными условиями и коэффициентами теплоотдачи $\alpha_{\text{ВО}}$:

1. Область соударения потока воды с поверхностью листа, которая характеризуется сравнительно плотным контактом охлаждающей воды с металлом, турбулентным течением охлаждающего потока и высокими коэффициентами теплоотдачи (до $\approx 390 \text{ кВт/м}^2 \cdot \text{К}$).

2. Область малой интенсивности водяного потока, характеризующаяся сниженным по сравнению с первой областью коэффициентом теплоотдачи.

3. Область пленочного кипения, характеризующаяся ламинарным течением охлаждающего потока. В данной области наблюдается образование парового слоя, отделяющего поверхность металла от расположенного выше слоя воды. Это приводит к значительному понижению коэффициента теплоотдачи.

Рассмотренные выше коэффициенты теплоотдачи $\alpha_{\text{ВО}}$ [13, 14] рассчитывались по формуле

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

где k – эмпирический параметр оборудования; $\lambda_{\text{В}}$ – коэффициент теплопроводности воды, Вт/(м·К); $v_{\text{В}}$ – скорость течения жидкости, м/с;

d_c – диаметр проходного сечения сопла, м; $t_{\text{В}}$ – температура воды; $t_{\text{Ме}}$ – температура металла.

Следует отметить, что коэффициент теплоотдачи роликам рольганга ничтожно мал в сравнении с коэффициентом теплоотдачи воде. В связи с этим в работе принято допущение, в соответствии с которым тепловые потери металла, обусловленные взаимодействием проката с роликами, не учитываются и принимаются равными нулю.

Для расчетов был принят «элементарный объем» металла, расположенный на продольной оси листа. Толщина референтного образца составляла 10 мм, как наиболее «проблемного» профиля. Количество элементов тетраэдральной сетки: 8000. С целью демонстрации особенностей и возможностей программы в качестве исследуемого материала выбрана микролегированная сталь (microalloyed steel) из стандартной библиотеки материалов DEFORM-3D. Коэффициент Пуассона: 0,3. Тип моделируемой среды: упругопластическая. Шаг расчета: 5°C. Температура нагрева металла под закалку: 860°C. Температура окружающей среды приравнивалась к температуре охлаждающей воды и принималась равной 23°C. Скорость перемещения листа через РЗМ: 14 м/мин. Давление охлаждающей воды: 500-600 кПа.

Результаты исследования и их обсуждение

Моделирование процесса охлаждения выполнено для четырех вариантов охлаждения, отличающихся общим расходом воды и распределением расхода воды по зонам. Исследуемые варианты схем охлаждения приведены в табл. 1.

Результаты исследования влияния схемы охлаждения на распределение температурных полей по сечению охлаждаемого металла представлены на рис. 1.

Таблица 1. Расходы воды по зонам ролико-закалочной машины

Table 1. Water consumption by zones of the roller-quenching machine

Номер варианта	Положение коллектора	Расход воды по зонам, м ³ /ч					Общий расход, м ³ /ч
		1	2	3	4	5	
1	Верх	520	845	0	0	0	3465
	Низ	800	1300	0	0	0	
2	Верх	200	340	285	275	285	3525
	Низ	320	520	440	420	440	
3	Верх	120	200	275	355	430	3500
	Низ	180	300	425	545	670	
4	Верх	700	1200	750	1150	1000	10200
	Низ	800	1300	1150	1150	1000	

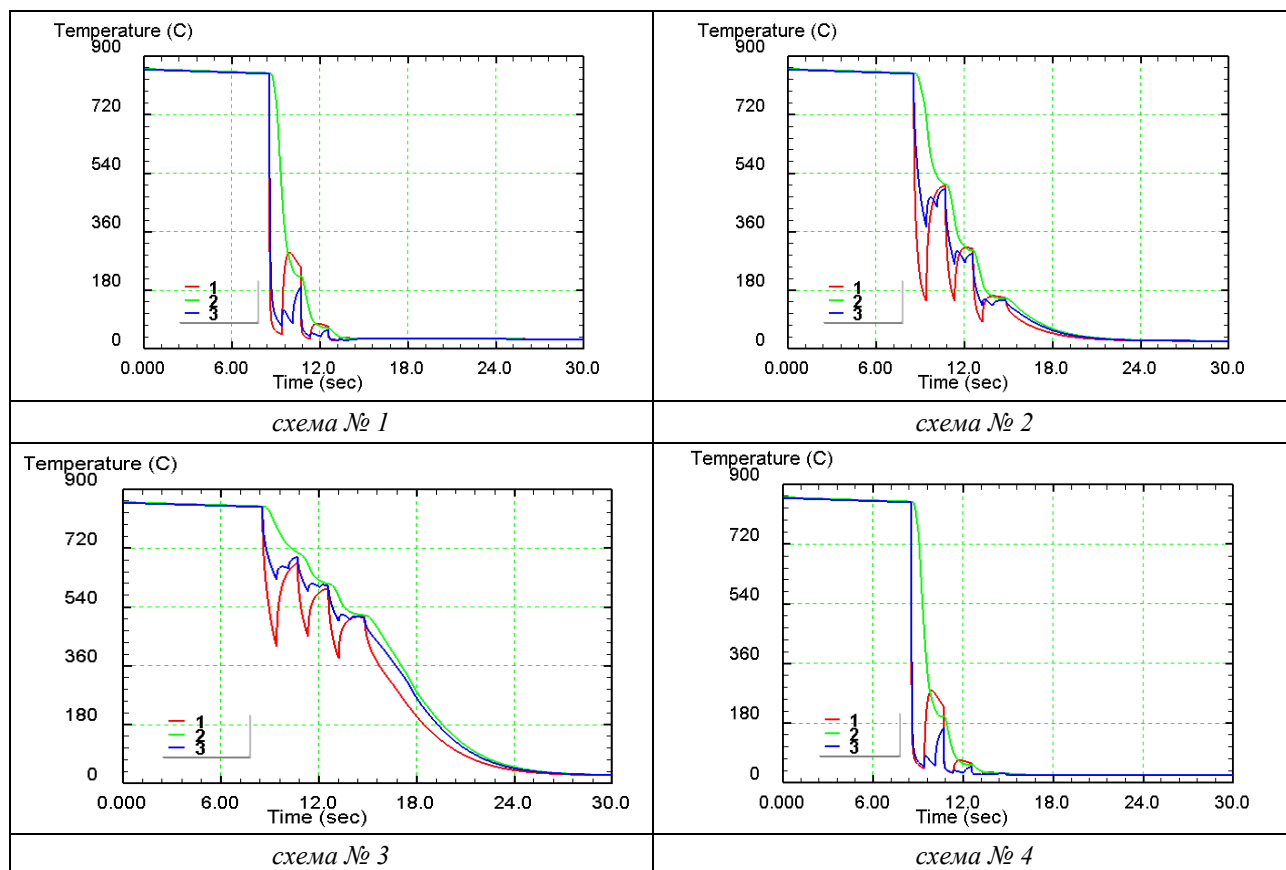


Рис. 1. Влияние схемы охлаждения на изменение температуры по сечению охлаждаемого металла:

1 – нижняя поверхность; 2 – центр; 3 – верхняя поверхность

Fig. 1. The influence of the cooling schedule on changes in temperature over the cross section of cooled steel:

1 is a bottom surface; 2 is a center; 3 is a top surface

Как следует из **рис. 1**, при охлаждении стали по варианту №1 (низ: максимальный расход воды; верх: расход воды составляет 65% от расхода снизу) наблюдается формирование незначительного градиента температур между верхней и нижней поверхностями листа: 25°C в 1-й зоне и 9°C в первом коллекторе 2-й зоны охлаждения. Верхняя поверхность листа является более горячей. Градиент температур между нижней поверхностью и центром металла составляет 437°C. Однако за счет того, что на верхней поверхности присутствует слой воды, температура нижней поверхности повышается и на входе во 2-ю зону охлаждения равна температуре центра (252°C). Закалка завершается в первом коллекторе 2-й зоны. Скорость охлаждения составляет 271°C/с.

При охлаждении стали по варианту №2 (наиболее равномерное распределение воды по зонам РЗМ) наблюдается значительный градиент температур между нижней и верхней поверхностью листа. Указанное явление наблюдается на протяжении всего процесса охлаждения. Наибольший градиент температур между верхней и нижней по-

верхностями листа создается в 1-й зоне охлаждения и составляет 235°C. Градиент температур между нижней поверхностью и центром составляет 565°C. В промежутке между коллекторами 1-й и 2-й зон охлаждения за счет горячих центральных слоев металла и малой интенсивности охлаждения поверхность проката разогревается. На входе в коллекторы 1-й и 2-й зон температура металла выравнивается по сечению. Градиент составляет около 10°C. Закалка завершается в начале 3-й зоны охлаждения. Скорость охлаждения составляет 97°C/с.

При охлаждении стали по варианту №3 (распределение расхода воды по нарастающей от 1-й к 5-й зоне охлаждения) прослеживаются закономерности, аналогичные закономерностям, наблюдаемым для схемы №2. Нижняя поверхность листа охлаждается быстрее верхней и до более низких температур. Наибольший градиент температур между верхней и нижней поверхностями создается в 1-й зоне охлаждения и составляет 201°C. Градиент температур между нижней поверхностью и центром составляет 363°C. На

входе в коллекторы 1-й и 2-й зон температура металла выравнивается по сечению: градиент составляет около 15-30°C. Закалка завершается в середине 3-й зоны охлаждения. Скорость охлаждения составляет 58°C/с.

Вариант охлаждения №4 (максимальный расход воды по всем зонам РЗМ) схож с вариантом №1. Однако за счет большего расхода воды в верхних коллекторах разность температур между верхней и нижней поверхностью листа составляет 5°C. В 1-й зоне охлаждения градиент температур между нижней поверхностью и центром листа составляет 405°C. На входе во 2-ю зону охлаждения температура центральных слоев проката составляет 230°C. Закалка завершается в первом коллекторе 2-й зоны. Скорость охлаждения составляет 281°C/с.

На рис. 2 приведены результаты исследования влияния схемы охлаждения на распределение напряжений по сечению охлаждаемого металла. Как следует из рис. 2, при охлаждении стали по варианту №1 (низ: максимальный расход воды;

верх: расход воды составляет 65% от расхода снизу), а также по варианту №4 (максимальный расход воды по всем зонам РЗМ) наблюдается схожая картина. В центральных слоях проката возникают максимальные растягивающие напряжения, а на нижней поверхности – максимальные сжимающие. Наибольшие значения указанные напряжения достигают в 1-й зоне охлаждения: 180 МПа для растягивающих и -72 МПа для сжимающих напряжений. На выходе из первого коллектора 2-й зоны при охлаждении проката по варианту №1 в верхней половине листа наблюдается некоторое снижение напряжений (на 10 МПа по сравнению с вариантом №4). При прохождении через остальные коллекторы металл имеет температуру менее 100°C, и все возникшие напряжения сохраняются в виде остаточных. При охлаждении проката по варианту №1 максимальные значения составляют 86 МПа для растягивающих и -11 МПа для сжимающих остаточных напряжений. При охлаждении проката по варианту №4 указанные напряжения составляют 93 МПа и -9 МПа соответственно.

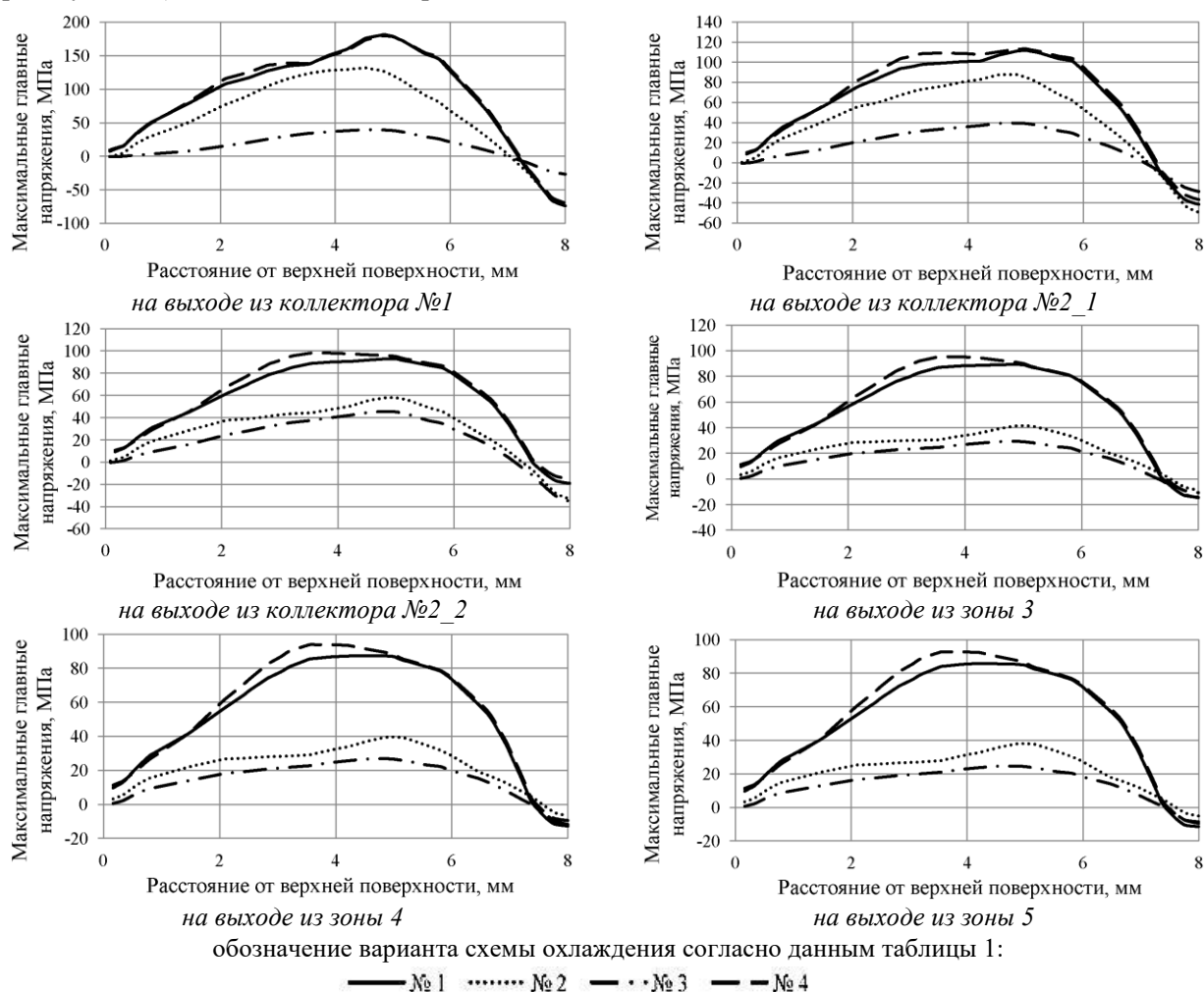


Рис. 2. Влияние схемы охлаждения на распределение напряжений по сечению охлаждаемого металла

Fig. 2. The influence of the cooling schedule on the distribution of stresses over the cross section of cooled steel

При охлаждении стали по варианту №2 (наиболее равномерное распределение воды по зонам РЗМ) максимальные растягивающие и сжимающие напряжения в центральных слоях и на поверхности проката также формируются в 1-й зоне охлаждения. Растягивающие напряжения составляют 131 МПа, а сжимающие напряжения достигают значения -73 МПа. На выходе из 3-й зоны охлаждения остаточные напряжения находятся на достаточно низком уровне и составляют 41 и -9 МПа для растягивающих и сжимающих напряжений соответственно.

Вариант охлаждения №3 (распределение расхода воды по нарастающей от 1-й к 5-й зоне охлаждения) отличается наименьшим уровнем напряжений, формируемых в металле. При охлаждении в 1-й и 2-й зонах в центральных слоях проката максимальные растягивающие напряжения находятся на уровне 40-45 МПа. На выходе из второго коллектора 2-й зоны охлаждения наблюдается некоторое увеличение сжимающих напряжений до -36 МПа. На выходе из РЗМ максимальные остаточные растягивающие и сжимающие напряжения составляют 24 и -10 МПа соответственно.

Следует отметить, что для всех вариантов охлаждения характерно то, что максимальные растягивающие напряжения формируются на расстоянии 3-3,5 мм от нижней поверхности проката. Это можно объяснить разностью в объемах подаваемой воды в верхних и нижних коллекторах.

Заключение

С использованием конечно-элементного моделирования в программном комплексе DEFORM-3D выполнен анализ влияния схемы охлаждения на распределение температурных полей и уровень напряжений, формируемых в толстолистовом прокате в процессе закалки. Показано, что с точки зрения обеспечения условий для снижения градиента напряжений в охлаждаемом металле наиболее эффективным является применение варианта №3. Указанная схема охлаждения предусматривает общий расход воды в объеме 3500 м³/ч и характеризуется возрастанием расхода воды при движении металла от 1-й к 5-й зоне. Однако такое распределение обеспечивает низкую скорость охлаждения металла в процессе закалки: скорость охлаждения составляет 58°С/с. При необходимости реализации более высоких скоростей охлаждения может быть использован вариант №2, предусматривающий общий расход воды в объеме 3525 м³/ч и характеризующийся наиболее равномерным распределением воды по зонам РЗМ.

Полученные данные служат научным заданием при проектировании прогрессивных технологий изготовления многофункциональных материалов с требуемым комплексом эксплуатационных характеристик.

Список источников

1. Барышников М.П., Чукин М.В., Бойко А.Б. Анализ программных комплексов для расчета напряженно-деформированного состояния композиционных материалов в процессах обработки давлением // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. № 4 (40). С. 72-74.
2. Development of a finite element model for calculation of the thermal field of coil rolled products in the thermomechanical process / Alekseev, D.Yu., Gulín, A.E., Emaleeva, D.G., Kuznetsova, A.S. // *Chernye metal-ly*, 2022(5), pp. 55-60.
3. Macro- and micromechanics of pearlitic-steel deformation in multistage wire production / Konstantinov D.V., Korchunov A.G., Zaitseva M.V., Shiryayev O.P., Emaleeva D.G. // *Steel in translation*, 2018, 48(7), pp. 458-462.
4. Microstructure-based computer simulation of pearlitic steel wire drawing / Konstantinov D., Korchunov A., Emaleeva D., Chukin M., Shiryayev O. // *Metal 2017 – 26th international conference on metallurgy and materials, Conference proceedings*. 2017. Pp. 642-647.
5. Multiscale simulation of cold axisymmetric deformation processes / Konstantinov D., Korchunov A. // *Key engineering materials*. 2016. T. 685. Pp. 18-22.
6. Multiscale computer simulation of drawing with statistical representation of TRIP steel microstructure / Konstantinov D.V., Korchunov A.G., Shiryayev O.P., Zaitseva M.V., kuznetsova a.s. // *steel in translation*, 2018, 48(4), Pp. 262-267.
7. Multiscale computer simulation of metastable steel rod drawing by using statistical representation of microstructure / Konstantinov D., Bzowski K., Korchunov A., Kuznetsova A., Shiryayev O. // *Metal 2017 – 26th International conference on metallurgy and materials, conference proceedings*, 2017, 2017-January, pp. 863-869.
8. Transient pool boiling heat transfer of oxidized and roughened Zircaloy-4 surfaces during water quenching / H. Yeom, H. Jo, G. Johnson et al. // *Intern. J. Heat and Mass Transfer*. 2018. V. 120. Pp. 435-446.
9. Пат. 1044149 РФ. Способ определения коэффициента теплоотдачи от поверхности конвективно охлаждаемых элементов / В.М. Сапожников, Г.П. Нагога; В.М. Сапожников, Г.П. Нагога; опубл. 10.12.2005.
10. Пат. 2001131534 РФ. Способ определения коэффициента теплоотдачи твердых тел / В.А. Калинин, В.И. Курепин, Р.Ф. Новоселов; опубл. 20.12.1995.
11. Пат. 93042904 РФ. Способ определения коэффициента теплоотдачи / М.Н. Жорник; опубл. 27.06.2003.

12. Wells M.A., Militzer M., Prodanovic V. Heat transfer during run-out table cooling – effect of jet configuration // Proceeding of the MST'2007 Conference. 2007. Detroit. Pp. 221-231.
13. Welty J.R., Wicks C.E., Wilson R.E., Rorrer G.L. Fundamental of Momentum, Heat, and Mass Transfer, 5th Edition. New York: J. Willey & Sons Inc. 2007. 729 p.
14. Panjkovic V. Model for prediction of strip temperature in hot strip steel mill // Appl. Therm. Eng. 2007. Vol. 27. Pp. 2404-2414.
6. Konstantinov D.V., Korchunov A.G., Shiryaev O.P., Zaitseva M.V., Kuznetsova A.S. Multiscale computer simulation of drawing with statistical representation of TRIP steel microstructure. Steel in Translation, 2018, 48(4), 262-267.
7. Konstantinov D., Bzowski K., Korchunov A., Kuznetsova A., Shiryaev O. Multiscale computer simulation of metastable steel rod drawing by using statistical representation of microstructure. Metal 2017 – The 26th International Conference on Metallurgy and Materials, Conference proceedings, 2017, January, pp. 863-869.
8. Yeom H., Jo H., Johnson G. et al. Transient pool boiling heat transfer of oxidized and roughened Zircaloy-4 surfaces during water quenching. Intern. J. Heat and Mass Transfer, 2018, 120, 435-446.
9. Sapozhnikov V.M., Nagoga G.P. *Sposob opredeleniya koeffitsienta teplootdachi ot poverkhnosti konvektivno okhlazhdaemykh elementov* [Method for determining the heat transfer coefficient from the surface of convectively cooled elements]. Patent RU, no. 1044149, 2005.
10. Kalinin V.A., Kurepin V.I., Novoselov R.F. *Sposob opredeleniya koeffitsienta teplootdachi tverdykh tel* [Method for determining the heat transfer coefficient of solids]. Patent RU, no. 2001131534, 1995.
11. Zhornik M.N. *Sposob opredeleniya koeffitsienta teplootdachi* [Method for determining the heat transfer coefficient]. Patent RU, no. 93042904, 2003.
12. Wells M. A., Militzer M., Prodanovic V. Heat transfer during run-out table cooling – effect of jet configuration. MST 2007 Conference Proceeding, Detroit, pp. 221-231.
13. Welty J.R., Wicks C.E., Wilson R.E., Rorrer G.L. Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer, 5th Edition. New York: J. Willey & Sons Inc. 2007, 729 p.
14. Panjkovic V. Model for prediction of strip temperature in hot strip steel mill. Appl. Therm. Eng., 27, 2007, 2404-2414.

References

1. Baryshnikov M.P., Chukin M.V., Boyko A.B. Analysis of software packages for calculating the stress-strain state of composite materials in metal forming processes. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2012, vol. 40, no. 4, pp. 72-74. (In Russ.)
2. Alekseev D.Yu., Gulín A.E., Emaleeva D.G., Kuznetsova A.S. Development of a finite element model for calculation of the thermal field of coil rolled products in the thermomechanical process. *Chernye Metally*, 2022, 5, 55-60.
3. Konstantinov D.V., Korchunov A.G., Zaitseva M.V., Shiryaev O.P., Emaleeva D.G. Macro- and micromechanics of pearlitic-steel deformation in multistage wire production. *Steel in Translation*, 2018, 48(7), 458-462.
4. Konstantinov D., Korchunov A., Emaleeva D., Chukin M., Shiryaev O. Microstructure-based computer simulation of pearlitic steel wire drawing. *Metal 2017 – The 26th International Conference on Metallurgy and Materials*, Conference proceedings, 2017, pp. 642-647.
5. Konstantinov D., Korchunov A. Multiscale simulation of cold axisymmetric deformation processes. *Key Engineering Materials*, 2016, 685, 18-22.

Поступила 21.09.2022; принята к публикации 11.10.2022; опубликована 22.12.2022
Submitted 21/09/2022; revised 11/10/2022; published 22/12/2022

Полецков Павел Петрович – доктор технических наук, директор инжинирингового центра НИС, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: pavel_poletskov@mail.ru. ORCID 0000-0001-9209-7759

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

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

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

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

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

Pavel P. Poletskov – DrSc (Eng.), Director of the Engineering Center of the Research and Development Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: pavel_poletskov@mail.ru. ORCID 0000-0001-9209-7759

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

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

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

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

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

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.92
DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-4-110-119



АПРОБАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ МОДЕЛИ КРУГЛОГО ВРЕЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Дегтярева-Кашутина А.С., Болдырев И.С.

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. В настоящее время повышается требование к точности изготавливаемых изделий, что приводит к увеличению финишных операций. Для закаленных поверхностей деталей одним из популярных методов является шлифование. В связи с высокой конкуренцией необходимо, чтобы повышение качества не сказывалось на себестоимости выпускаемой продукции, поэтому на производстве активно внедряются технологии по повышению эффективности. Один из таких методов – это циклы обработки. Чаще всего проектирование циклов аналитическим методом производится за счет учета ряда ограничений, например по мощности, жесткости технологической системы, допускам на размер и отсутствие температурных дефектов. Технологической особенностью процесса шлифования является его высокая теплонапряженность, вследствие чего температура в зоне обработки может достигать температуры плавления стали. Это приводит к возникновению необратимых дефектов на поверхности готовой детали, а следовательно, к браку и издержкам производства. Из этого можно сделать вывод, что ограничение по температуре является ключевым при проектировании циклов обработки. В рамках данной статьи проводилась проверка разработанной ранее температурной модели круглого врезного шлифования. Проверка осуществлялась с помощью сравнения распределения температуры в заготовке при моделировании процесса обработки методом конечно-элементного моделирования в программной среде Ansys и данными расчетов проверяемой модели. В результате апробации установлено, что погрешность между максимальными температурами в зоне обработки не превышает 7%, что позволяет признать разработанную модель адекватной. Кроме того, в дальнейшем планируется провести ряд экспериментов, проверяющих работу температурной модели при проектировании цикла обработки.

Ключевые слова: температура при шлифовании, непригодность, цикл обработки, метод конечных элементов

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант № FENU-2020-0020).

© Дегтярева-Кашутина А.С., Болдырев И.С., 2022

Для цитирования

Дегтярева-Кашутина А.С., Болдырев И.С. Апробация температурной модели круглого врезного шлифования с использованием метода конечных элементов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №4. С. 110-119. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-110-119>



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

TESTING A TEMPERATURE MODEL OF CYLINDRICAL PLUNGE GRINDING USING THE FINITE ELEMENT METHOD

Degtyareva-Kashutina A.S., Boldyrev I.S.

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Now the requirement for the accuracy of manufactured products is rising, leading to an increase in finishing operations. One of the commonly used methods for hardened workpiece surfaces is grinding. Due to intense competition, quality improvement should not influence the cost of products; therefore, technologies aimed at improving efficiency are actively introduced in production. One of such methods is machining cycles. The cycles are often designed by an analytical method factoring into a number of restrictions, for example, in terms of power, rigidity of the technological system, dimensional tolerances, and the absence of temperature defects. A technological feature of the grinding process is its high heat stress, as a result of which the temperature in the machining zone can reach steel melting temperature. This leads to irreversible defects on the surface of the finished part and, consequently, rejected products and production costs. In view of this, it may be concluded that the temperature limit is key in the design of machining cycles. The paper describes testing of a previously developed temperature model of cylindrical plunge grinding. The testing was carried out by comparing the temperature distribution in the workpiece, when simulating the machining process using the finite element modeling method in the Ansys software environment, and the calculation data of the tested model. As a result of such testing, it was found that the error between maximum temperatures in the machining zone did not exceed 7%, allowing us to recognize the developed model as adequate. In addition, in future we intend to conduct a number of experiments to test the operation of the temperature model when designing a machining cycle.

Keywords: grinding temperature, absence of temperature defects, machining cycle, finite element method

The research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (grant No. FENU-2020-0020).

For citation

Degtyareva-Kashutina A.S., Boldyrev I.S. Testing a Temperature Model of Cylindrical Plunge Grinding Using the Finite Element Method. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 4, pp. 110-119. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-110-119>

Введение

В современном производстве для финишной обработки закаленных поверхностей деталей применяется операция шлифования. Для повышения эффективности данной операции производится закупка современных станков с числовым программным управлением (ЧПУ), что позволяет выполнять обработку с применением такого технологического приёма, как цикл. Цикл обработки – это совокупность движений инструмента, повторяющихся при обработке каждой детали. Применение данного приёма позволяет повысить производительность. Проектирование циклов обработки может происходить несколькими методами: с использованием нормативов и справочников режимов резания, с помощью предустановленных в систему ЧПУ станка циклов и применяя аналитические методы.

Циклы, спроектированные по нормативам, имеют следующие допущения: адаптация нормативных значений под конкретные условия обработки производится с помощью эмпирических коэффициентов [1]. Кроме того, количество ступеней

цикла постоянно, что не гарантирует максимальное качество и производительность [2]. Проектирование циклов с помощью предустановленных в стойку ЧПУ программ напоминает работу «черного ящика», следовательно, оператор не может управлять качеством и скоростью обработки [3, 4]. Аналитический метод представлен различными математическими моделями отечественных и зарубежных ученых. В нашей стране основоположником считается Лурье [5], но подробнее рассмотрим современные модели проектирования циклов.

В работах П.П. Переверзева и А.В. Акинцевой [6, 7] описывается методология комплексной структурно-параметрической оптимизации циклов круглого шлифования. Реализация данной методологии производится через цифровой двойник процесса, который учитывает съём металла при изменении таких параметров, как сила резания, глубина резания, жесткость технологической системы, припуск на обработку и износ шлифовального круга. Кроме того, цифровой двойник оптимизирует цикл обработки с помощью метода динамического программирования, исходя из ограничений по требуемой точности

обработки, технологических возможностей оборудования и режущего инструмента.

Авторы статей [8, 9] реализуют оптимизацию режимов обработки на операции шлифования для обеспечения минимальной шероховатости обрабатываемой поверхности. Задача оптимизации реализована с помощью системы линейных уравнений, которые описывают шестнадцать ограничений: по периоду стойкости, твердости и режущей способности шлифовального круга, по деформациям технологической системы, которые выражены через силу резания, по возможностям оборудования и максимально возможным технико-экономическим показателям. Ряд параметров авторы описывают эмпирическими зависимостями.

Авторами [10, 11] разработан программный модуль, который позволяет произвести расчет эффективного цикла для станка с ЧПУ. Данный программный модуль строит цикл шлифования, учитывая ряд ограничений по требуемой шероховатости, возможностям оборудования, износу шлифовального круга, бесприжоговости обработки, жесткости технологической системы.

Среди зарубежных ученых первопроходцем в оптимизации циклов шлифования считается С. Малкин [12], который предложил метод оптимизации, позволяющий обеспечивать требуемое качество поверхности за минимальное время обработки. Оптимизация происходит в два этапа: на первом этапе определяется максимально допустимая скорость радиальной подачи, на втором производится корректировка цикла с учетом размера прижога, который образуется на предыдущем рабочем ходу. Второй этап реализуется за счет ускоренного снятия материала на первых ступенях цикла с последующим снижением подачи по мере снятия припуска.

Авторами [13, 14] разработана методика проектирования циклов для процессов круглого и бесцентрового шлифования, основанная на стратегии непрерывного изменения скорости. Эта технология позволяет повысить контроль над кинематикой процесса шлифовки и механизмом удаления стружки. Методика реализована в виде динамической модели, в которой можно анализировать изменение средней толщины стружки, сил и мощности шлифования, шероховатость заготовки, допуски на размеры и допуски формы, термические дефекты и жесткость технологической системы.

В работах [15, 16] описывают применение искусственного интеллекта для моделирования и оптимизации процесса шлифования. Авторами [16] разработана методология оптимизации про-

цесса шлифования, которая использует многослойный персептрон (MLP) ANN, связанный с NSGA-II, в форме целевой функции. Методология состояла из трех этапов. На первом формировался набор экспериментальных данных, содержащий входные параметры процесса шлифования, связанные с выходными, которые определяют качество обработки. Поскольку дальнейшая оптимизация процесса будет производиться за счет управления входными параметрами, поэтому перед математическим моделированием необходимо выделить минимальное количество наиболее важных. Второй был посвящен обучению и проверке MLP ANN как симулятора процесса шлифования. Наконец, третий, касался генерации оптимизированных решений с помощью NSGA-II, связанных с уже обученным MLP ANN. В итоге полученный симулятор выдавал данные, совпадающие с уже описанными для операций шлифования. Авторами статьи [15] отмечается, что большинство моделей с использованием искусственного интеллекта строится на ограниченном количестве экспериментальных данных, что значительно снижает круг их применимости.

Оптимизация и управление процессом шлифования производится с помощью реализации в программе MATLAB целевой функции с ограничениями [17]. Ограничения накладываются на следующие параметры: мощность обработки, глубина прижога, шероховатость поверхности, допуск на изготовление.

Из рассмотренных выше работ можно сделать вывод, что оптимизация процесса шлифования с применением циклов обработки является актуальной задачей в настоящее время. Большинство авторов [10-14, 17] подчеркивают важность учета ограничения по отсутствию температурных дефектов на поверхности детали. Поэтому целью данной работы является проверка работоспособности разработанной температурной модели [18] круглого врезного шлифования по средствам сравнения расчетных данных с данными, полученными методом конечно-элементного моделирования.

Обзор литературы

Количество тепла, выделяемого в процессе шлифования вследствие больших скоростей, значительно выше, чем при других видах обработки металлов резанием. Мгновенная температура в зоне контакта может достигать температуры плавления стали, что приводит к изменению структуры поверхностного слоя детали [19]. Второй причиной возникновения температурных дефектов

является низкая теплопроводность абразивного круга и малые, для значительного отвода тепла, размеры стружки, поэтому около 94% тепла при шлифовании переходят в заготовку [20, 21].

Шлифование является финишной операцией механической обработки, которая чаще всего производится на закаленных деталях, и изменение структуры поверхностного слоя вследствие температурных деформаций приводит к неисправимому браку. Поэтому разработана температурная модель взаимодействия шлифовального круга и заготовки при круглом врезном шлифовании. Данная модель позволяет производить расчет температуры как на поверхности детали, так и на любом расстоянии от неё с учетом съема припуска. Для применения разработанной модели для проектирования циклов обработки необходима её апробация. Есть несколько методов проверки математической модели: сопоставление данных с экспериментальными данными и сопоставление с данными другой проверенной модели. Рассмотрим варианты экспериментальных исследований.

Для измерения температуры в процессе шлифования применяют различные технологии, которые можно разделить на два типа – контактные и бесконтактные. Контактное измерение температуры с использованием термопар имеет широкое распространение из-за ряда преимуществ: простота конструкции, надежность и низкая стоимость. Термопары устанавливаются с обратной стороны от обрабатываемой поверхности через небольшое отверстие. Затем производится шлифование поверхности с параллельным измерением температуры [22, 23]. Однако из-за особенностей установки проволочных термопар прямое измерение температуры поверхности затруднено.

Авторами в [24] для измерения температуры предложен массив термопар из фольги. Контакты замыкаются в процессе шлифования и производится фиксация температуры поверхности шлифования в 2D/3D-отображении. Установлено в [25], что пространственное распределение поля температуры шлифования неоднородно, и часто геометрия термопары намного больше, чем температурный градиент, что приводит к значительным отклонениям в результатах измерений.

В отличие от контактных методов измерения, бесконтактные позволяют избежать отклонения температурного поля, вызванного внедрением термопар. Тепловизоры и пирометрические системы активно используются для контроля температуры в реальном времени при обработке шлифованием [26, 27]. Однако из-за того, что зо-

на контакта шлифовального круга и детали перекрывается охлаждающей жидкостью, тепловизионной камере сложно измерить температуру именно на обрабатываемой поверхности. Кроме того, скорость отклика тепловизионного изображения намного меньше, чем изменение температуры, что увеличивает погрешность измерений.

Авторами [28] установлена взаимосвязь между переходными характеристиками теплопередачи при шлифовании и разнообразием металлургических превращений. Для этого проводился эксперимент по измерению температуры при сухом шлифовании, после чего фиксировалось изображение обработанной поверхности и применялся улучшенный алгоритм его распознавания. Выявленные закономерности распространяются на углеродистые стали и большинство металлических материалов (процесс шлифования сопровождается аустенитизацией). При этом пространственное и временное распределение поля температур на обработанной поверхности точно реконструируется на основе металлографических характеристик и алгоритма циклической обратной связи.

Экспериментальные методы требуют дорогостоящего оборудования и имеют ряд ограничений для применения. Рассмотрим аналитические методы расчета температуры при шлифовании.

Метод конечных элементов (МКЭ) имеет широкое применение как для моделирования поведения материала, так и для анализа взаимодействия с нескольких физических полей. Авторы [29, 30], используя МКЭ, смоделировали переходное температурное поле и поле тепловых напряжений, генерируемое в заготовке, с учетом изменения свойств материала под действием температуры. В статье [31] разработана МКЭ-модель для прогнозирования температурного поля при круглом шлифовании. Взаимодействие круга и заготовки происходит на определенном пятне контакта с постоянной скоростью, без учета смаочно-охлаждающей жидкости.

Помимо МКЭ для прогнозирования температуры при шлифовании применяют метод конечных блоков (МКБ) без сетки. Основной особенностью МКБ без сетки является то, что физическая область разделена на несколько блоков (как элементы в МКЭ), и каждому блоку присваивается определенное уравнение. Затем непрерывные условия используются для соединения каждых двух соседних блоков [32].

Также для моделирования температурного поля в зоне шлифования применяется метод конечных разностей. Авторы [33] создали конечно-

разностную модель на основе теории теплопередачи и теплопроводности при шлифовании. Впоследствии [34] предложили улучшенный МКР для трехмерного температурного поля, который объединяет дифференциальные уравнения различных точек, и эффективность вычислений повышается примерно на 20%. МКР может точно имитировать сложный процесс теплопередачи заготовки, но источник входного тепла и распределение энергии необходимо определить заранее. Однако источник тепла и распределение энергии определяются в основном простой дискретизацией результатов теоретического анализа, что вносит погрешность анализа в процесс дифференциального теплообмена и влияет на точность поля температуры.

Материалы и методы исследования

Методология и методы исследования основывались на фундаментальных положениях теории технологии машиностроения, теории резания при лезвийной и абразивной обработке, законах теории теплопроводности твердых тел.

В рамках данной работы применяется метод конечно-элементного моделирования взаимодействия шлифовального круга с заготовкой с учетом теплообмена с окружающей средой. Программных пакетов, обладающих необходимыми функционалом, два: COMSOL Multiphysics и ANSYS Mechanical.

COMSOL Multiphysics – это интегрированная среда численного моделирования, в которой можно выполнить все этапы построения расчетных моделей, – от создания геометрии, определения свойств материалов и описания физических явлений до настройки решения и визуализации результатов.

Ansys Mechanical – это программный продукт, позволяющий провести анализ статической прочности конструкций, в том числе с учетом изменения исходной формы конструкции, сложного контактного взаимодействия деталей в сборке, нелинейного поведения материалов. В качестве нагрузок могут быть учтены как усилия, давления или известные перемещения, так и воздействия, вычисленные в специальных расчетных моделях, такие как сложное распределение температуры в теле. Ansys Mechanical позволяет произвести моделирование с учетом большего количества факторов, что минимизирует допущения, полагаемые при моделировании процесса, в отличие от реальных условий. Поэтому для решения поставленной задачи применялся именно этот программный продукт.

Полученные результаты и их обсуждение

Для проведения конечно-элементного моделирования и расчетов в проверяемой программе принимались следующие исходные данные. Материал заготовки – сталь 30ХГСНА, диаметр заготовки – 70 мм, высота – 10 мм. Скорость вращения заготовки $V_d = 35$ м/мин = 158 об/мин. Толщина среза $a = 0,006$ м. Припуск на обработку – 0,5 мм.

Диаметр круга – 600 мм, материал круга – электрокорунд, зернистость – F46, твердость – средняя СТ2, структура – 6. Объемное содержание зерен, связки и пор для используемого круга составляет: $W_z = 0,5$; $W_c = 0,17$; $W_n = 0,33$ [35]. Размер зерна $d_z = 0,37$ мм = $370 \cdot 10^{-6}$ м. Скорость круга $V_k = 50$ м/с, скорость радиальной подачи постоянна и равна $S_{рад} = 1,25$ мм/мин.

Для решения задачи теплопроводности представим заготовку в виде цилиндра с теплоизолированными торцами. Взаимодействие шлифовального круга и заготовки происходит по дуге контакта (зоне резания). Шлифовальный круг представим в виде теплового источника мощностью Q , который перемещается по поверхности заготовки с угловой скоростью V_d . Вне зоны резания с поверхности заготовки происходит теплоотдача с коэффициентом α .

Уравнение теплопроводности в полярных координатах:

$$c \frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{\lambda \partial U}{r \partial r} + \frac{\partial}{r^2 \partial \varphi} \left(\frac{\lambda \partial U}{\partial \varphi} \right), \quad (1)$$

где r – текущий радиус, м; φ – текущий угол, град; t – время, с; U – температура, °C; c – теплоемкость материала заготовки, Дж/м³·°C; λ – теплопроводность материала заготовки, Дж/м·с·°C.

Краевые условия в зоне резания:

$$\lambda \frac{\partial u}{\partial r} = Q. \quad (2)$$

Краевые условия вне зоны резания:

$$\lambda \frac{\partial u}{\partial r} = \alpha(T - U), \quad (3)$$

где T – температура окружающей среды, °C.

В двумерной схеме получаем задачу в виде уравнения теплопроводности и совокупности краевых условий второго и третьего рода, то есть смешанную краевую задачу для уравнения (1).

Деталь разбивалась сеточкой, состоящей из 40 слоев и 80 углов, то есть для заготовки диаметром 70 мм шаг между слоями равен 1,75 мм, а разница между углами – 4,5°, длина дуги на поверхности равна 2,75 мм. Тепловой источник

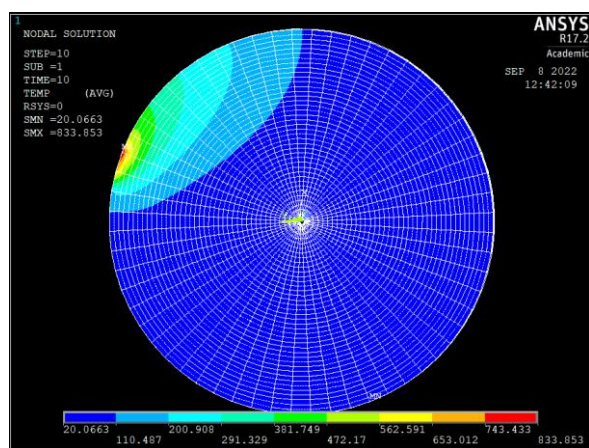
моделировался как сплошной поток постоянной интенсивности. Начальная температура заготовки и окружающей среды задавалась 20°C . Подвод смазочно-охлаждающей жидкости учитывался как воздействие охлаждающего источника ограниченного размера, с учетом тепло- и температуропроводности материала заготовки.

При данных условиях снятие припуска происходит за 63 оборота заготовки. На **рис. 1** представлены данные распределения температуры на 10-ти (а), 20-ти (б), 30-ти (в) и 60-ти (г) оборотах.

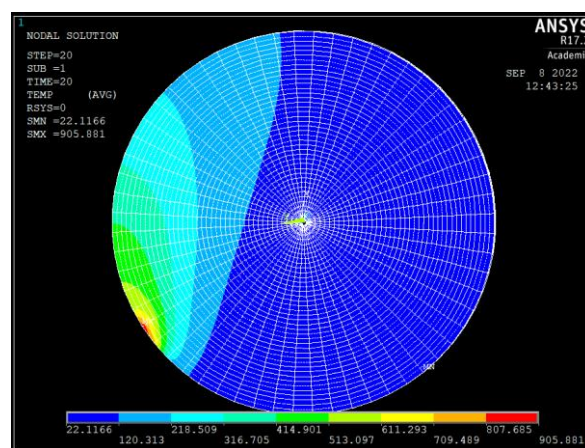
Как видно из представленных распределений, максимальная температура в зоне обработки на 60-м обороте и составила $1574,67^{\circ}\text{C}$, минимальная температура на этом же обороте равна $193,108^{\circ}\text{C}$. С учетом того, что расстояние между слоями равно $1,75\text{ мм}$, а размер снимаемого припуска $0,5\text{ мм}$, то прижог на поверхности готовой детали образовался на 20-м обороте, где температура в зоне резания составила $905,881^{\circ}\text{C}$, а температура на 2-м слое $709,5^{\circ}\text{C}$ (см. **рис. 1, б**).

При расчете в проверяемой температурной модели круглого врезного шлифования на последнем обороте температура в пятне контакта круга и заготовки достигала $1474,028^{\circ}\text{C}$, а в большей части детали $169,5^{\circ}\text{C}$ (**рис. 2**).

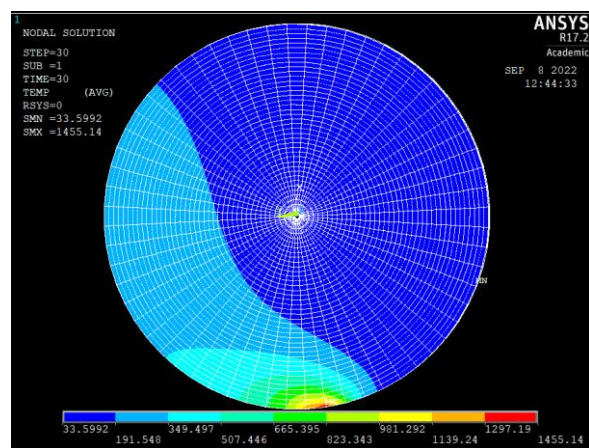
Разница между максимальными температурами моделирования и расчета составила менее 7%, а между минимальными 14%. Большую разницу между минимальными температурами можно объяснить особенностью расчетов температурной модели, которая в отличие от МКЭ считает температуру по секторам сетки, принимая, что в рамках одного сектора температура одинаковая. Следовательно, увеличивая количество секторов, повышается точность расчетов, но при этом возрастает их длительность, что не всегда оправдано. Поскольку основной задачей разработанной температурной модели является снижение подачи при приближении температуры на поверхности детали к максимально допустимой, то можно считать, что апробация прошла успешно.



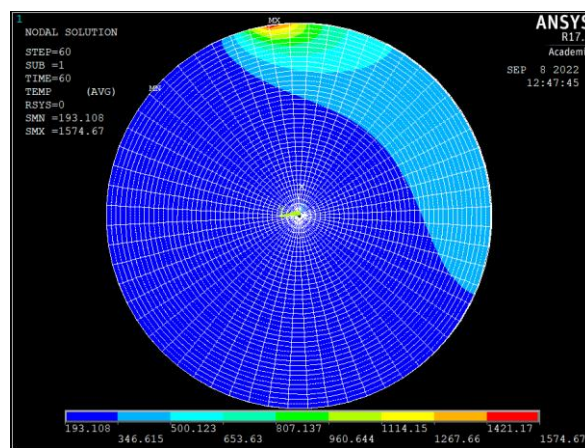
а



б



в



г

Рис. 1. Распределение температуры в заготовке при обработке шлифованием на: а – 10-ти оборотах; б – 20-ти оборотах; в – 30-ти оборотах; г – 60-ти оборотах

Fig. 1. Temperature distribution in the workpiece during grinding on: а is 10 turns; б is 20 turns; в is 30 turns; г is 60 turns

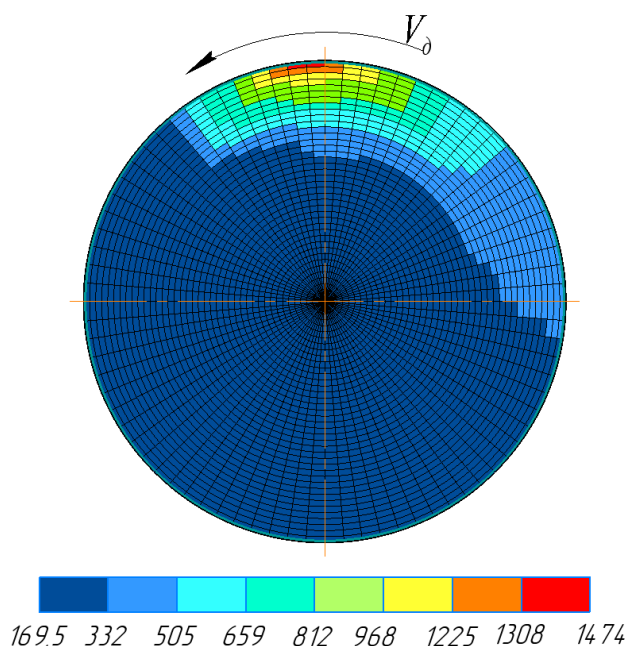


Рис. 2. Распределение температуры в заготовке на 60-м обороте при расчете в температурной модели
 Fig. 2. Temperature distribution in the workpiece at the 60th turn when calculated in the temperature model

Закключение

Проведена апробация разработанной температурной модели для круглого врезного шлифования, в ходе которой установлено, что погрешность между максимальными температурами, рассчитанными методом конечных элементов и проверяемой моделью, составляет менее 7%.

В дальнейшем планируется провести проверку на своевременность переключения радиальной подачи в процессе обработки с целью обеспечения бесприжоговости.

Список источников

1. Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания для нормирования работ, выполняемых на универсальных и многоцелевых станках с числовым программным управлением: справочник / Переверзев П.П. [и др.]. М.: Экономика, 1990. 394 с.
2. Вереина Л.И., Краснов М.М., Фрадкин Е.И. Абразивная обработка: справочник. М.: ИНФРА-М, 2017. 304 с.
3. Fanuc Series 30i-Model B. Fanuc Series 31i-Model B. Fanuc Series 32i-Model B. Для систем многоцелевого станка. Руководство по эксплуатации. 2012. 474 с.
4. Studer. Grinding software [Электронный ресурс]: офиц. сайт. 2022. URL: <https://www.studer.com/en/cylindrical-grinding-machines/software-options/grinding-software/> (дата обращения 06.09.2022).
5. Лурье Г.Б. Прогрессивные методы круглого наружного шлифования. Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1984. 103 с.
6. Акинцева А.В., Переверзев П.П. Основные этапы создания единой методологии комплексной структурно-параметрической оптимизации циклов круглого шлифования с ЧПУ // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2021. Т. 21. № 4. С. 37-48. DOI: 10.14529/engin210404.
7. Analytical basics of digital twin for CNC round grinding process / A.V. Akintseva, P.P. Pereverzev, B. Reshetnikov, A.V. Irshin // Materials Today: Proceedings, 2020, pp. 1740-1744. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.08.244
8. Влияние условий обработки на эффективность шлифования микропористого покрытия / Н.С. Алексеев, А.В. Шашок, В.А. Капорин, С.В. Иванов // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2019. № 2(50). С. 89-94. DOI: 10.31563/1684-7628-2019-50-2-89-94.
9. Обработка шлифованием высоколегированных коррозионно-стойких сталей на примере 12X18H10T / А.М. Романенко, Д.Б. Шатько, А.А. Непогожев, Я.С. Караваев // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2021. № 3(38). С. 98-106. DOI: 10.38013/2542-0542-2021-3-98-106.
10. Guzeev V.I., Nurkenov A.K. Researching the CNC-Machine Stiffness Impact on the Grinding Cycle Design // Procedia Engineering, 2016, vol. 150, pp. 815-820. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.118>.
11. Shipulin L.V., Nurkenov A.Kh, Mazein P.G. Implementation of the design concept of a high-speed processing cycle for CNC machines in the form of a software module CAM-system // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2018. Vol. 450, iss. 3. Number 032028. doi.org/10.1088/1757-899X/450/3/032028

12. Malkin S. Grinding Cycle Optimization // CIRP Annals, 1981, vol. 30, Iss. 1, pp. 223-226, [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60930-5](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60930-5).
13. Alvarez J., Barrenetxea D., Marquinez J.I. et al. Continuous variable feed rate: a novel method for improving infeed grinding processes. // Int J Adv Manuf Technol, 2014, vol. 73, pp. 53-61. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5771-1>
14. Barrenetxea D., Alvarez J., Marquinez J.I., Sanchez J.A. Grinding with controlled kinematics and chip removal // CIRP Annals, 2016, vol. 65, Iss. 1, pp. 341-344, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.097>.
15. Modelling and monitoring of abrasive finishing processes using artificial intelligence techniques: A review/ V. Pandiyan, S. Shevchik, K. Wasmer, S. Castagne, T. Tjahjowidodo // Journal of Manufacturing Processes, 2020, vol. 57, pp. 114-135. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.06.013>.
16. Nametala C.A.L., Souza A.M., Júnior B.R.P, da Silva E.J. A simulator based on artificial neural networks and NSGA-II for prediction and optimization of the grinding process of superalloys with high performance grinding wheels/ C.A.L. Nametala, A.M. Souza, B.R.P Júnior, E.J. da Silva // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2020, Volume 30, Pages 157-173. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.05.004>.
17. Li G.F., Wang L.S., Yang L.B. Multi-parameter optimization and control of the cylindrical grinding process // Journal of Materials Processing Technology, 2002, vol. 129, Iss. 1-3, pp. 232-236, [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00607-6](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00607-6).
18. Дегтярева-Кашутина А.С., Болдырев И.С. Математическая модель определения температуры в зоне контакта при круглом врезном шлифовании // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №3. С. 94-102. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-3-94-102>
19. Евсеев Д.Г. Формирование свойств поверхностных слоев при абразивной обработке. Саратов: Изд-во Саратовского университета, 1975. 127 с.
20. Калинин Е.П. Теория и практика управления производительностью шлифования без прижогов с учетом затупления инструмента. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. 358 с.
21. Kadivar M., Azarhoushang B. Cutting temperature and energy partitioning in grinding // Tribology and Fundamentals of Abrasive Machining Processes (Third Edition), William Andrew Publishing, 2022, pp. 469-505, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823777-9.00002-1>.
22. Temperature measurement of surface grinding using a fluid supplying system from inside of grinding wheel / Z. Li, Y. Yao, K. Nakae, H. Sasahara // Emerg. Technol. Precis. Eng. Xiv, 2012, vol. 523-524, pp. 125-130. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.523-524.125>
23. Yi J., Sheng X.M., Feng C.B. Temperature measurement and simulation in stainless steel high-speed grinding // Applied Mechanics and Materials. 2012. T. 184. C. 684-687. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.184-185.684>
24. Li H.N., Axinte D. On a stochastically grain-discretised model for 2D/3D temperature mapping prediction in grinding // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2017. T. 116. C. 60-76.
25. Liu D. et al. An in-situ infrared temperature-measurement method with back focusing on surface for creep-feed grinding // Measurement. 2016. T. 94. C. 645-652.
26. Dai S.J., Li X.Q., Zhang H.B. Research on temperature field of non-uniform heat source model in surface grinding by cup wheel //Advances in Manufacturing. 2019. T. 7. № 3. C. 326-342.
27. Han J. et al. In situ measurement of cutting edge temperature in turning using a near-infrared fiber-optic two-color pyrometer // Measurement. 2020. T. 156. C. 107595.
28. Metallographic method for temperature measurement: Reconstruction of grinding temperature field based on critical austenitizing depth and cyclic feedback algorithm / Y. Hong, S. Xiu, C. Sun, Y. Zhao, X. Zhang // Journal of Materials Processing Technology. 2022. Vol. 310. No. 117770, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.117770>.
29. Numerical Modeling of Transient Temperature and Stress in WC-10Co4Cr Coating During High-Speed Grinding / J. Yi, Z.H. Deng, W. Zhou, S.J. Li // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2020. T. 21. № 4. C. 585-598.
30. Miao Q., Li H.N., Ding W.F. On the temperature field in the creep feed grinding of turbine blade root: Simulation and experiments // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020. T. 147. C. 118957.
31. Finite element modelling of temperature in cylindrical grinding for future integration in a digital twin / A. Heininen, R. Prod'Hon, H. Mokhtarian, E. Coatanéa, K. Koskinen // Procedia CIRP, 2021, vol. 104, pp. 875-880, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.147>.
32. Grinding temperature field prediction by meshless finite block method with double infinite element / Z.Wang, T. Yu, X. Wang, T. Zhang, Ji Zhao, P.H. Wen // International Journal of Mechanical Sciences, 2019, vol. 153-154, pp. 131-142, <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.01.037>.
33. Zhang J. et al. Temperature field model and experimental verification on cryogenic air nanofluid minimum quantity lubrication grinding // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. T. 97. № 1. C. 209-228.
34. Chen H. et al. Simulation of 3D grinding temperature field by using an improved finite difference method // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020. T. 108. № 11. C. 3871-3884.
35. Островский В.И. Теоретические основы процесса шлифования. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. 144 с.

References

1. Pereverzev P.P. et al. *Obshchemashinostroitelnye normativy vremeni i rezhimov rezaniya dlya normirovaniya rabot, vopolnyayemykh na universalnykh i mnog-*

- otselevykh stankakh s chislovym programmnyim upravleniem: spravochnik* [General machine building standards in cutting time and conditions for setting norms of operations performed on universal and multi-purpose CNC machines: a reference book]. Moscow: Ekonomika, 1990, 394 p. (In Russ.)
2. Vereina L.I., Krasnov M.M., Fradkin E.I. *Abrazivnaya obrabotka: spravochnik* [Abrasive processing: a reference book]. Moscow: INFRA-M, 2017, 304 p. (In Russ.)
 3. Fanuc Series 30i-Model B. Fanuc Series 31i-Model B. Fanuc Series 32i-Model B. For multi-purpose machine systems. Manual. 2012, 474 p.
 4. Studer. Grinding software. Available at: <https://www.studer.com/en/cylindrical-grinding-machines/software-options/grinding-software/> (Accessed on September 06, 2022).
 5. Lurie G.B. *Progressivnye metody kruglogo naruzhnogo shlifovaniya* [Advanced methods of circular external grinding]. Leningrad: Mashinostroenie, Leningrad Department, 1984, 103 p. (In Russ.)
 6. Akintseva A.V., Pereverzev P.P. Main stages of developing a unified methodology for integrated structural and parametric optimization of circular grinding cycles with CNC. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie* [Bulletin of South Ural State University. Series: Mechanical Engineering], 2021, vol. 21, no. 4, pp. 37-48. DOI: 10.14529/engin210404
 7. Akintseva A.V., Pereverzev P.P., Reshetnikov B., Irshin A.V. Analytical basics of digital twin for CNC round grinding process. *Materials Today: Proceedings*, 2020, pp. 1740-1744. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.08.244
 8. Alekseev N.S., Shashok A.V., Kaporin V.A., Ivanov S.V. Influence of processing conditions on efficiency of grinding a microporous coating. *Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of Bashkir State Agrarian University], 2019, no. 2(50), pp. 89-94. DOI: 10.31563/1684-7628-2019-50-2-89-94
 9. Romanenko A.M., Shatko D.B., Nepogozhev A.A., Karavaev Ya.S. Grinding of high-alloy corrosion-resistant steels using 12Kh18N10T steel grade as an example. *Vestnik Kontserna VKO "Almaz – Antey"* [Journal of Almaz – Antey Air and Space Defence Corporation], 2021, no. 3(38), pp. 98-106. DOI: 10.38013/2542-0542-2021-3-98-106
 10. Guzeev V.I., Nurkenov A.K. Researching the CNC-machine stiffness impact on the grinding cycle design. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 150, pp. 815-820. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.118>.
 11. Shipulin L.V., Nurkenov A.Kh., Mazein P.G. Implementation of the design concept of a high-speed processing cycle for CNC machines in the form of a software module CAM-system. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2018, vol. 450, no. 3. Number 032028. DOI: 10.1088/1757-899X/450/3/032028
 12. Malkin S. Grinding cycle optimization. *CIRP Annals*, 1981, vol. 30, no. 1, pp. 223-226. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60930-5](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60930-5)
 13. Alvarez J., Barrenetxea D., Marquinez J.I. et al. Continuous variable feed rate: a novel method for improving infeed grinding processes. *Int J Adv Manuf Technol*, 2014, vol. 73, pp. 53-61. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5771-1>
 14. Barrenetxea D., Alvarez J., Marquinez J.I., Sanchez J.A. Grinding with controlled kinematics and chip removal. *CIRP Annals*, 2016, vol. 65, no. 1, pp. 341-344. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.097>
 15. Pandiyan V., Shevchik S., Wasmer K., Castagne S., Tjahjowidodo T. Modelling and monitoring of abrasive finishing processes using artificial intelligence techniques: A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, vol. 57, pp. 114-135. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.06.013>
 16. Nametala C.A.L., Souza A.M., Júnior B.R.P., da Silva E.J. A simulator based on artificial neural networks and NSGA-II for prediction and optimization of the grinding process of superalloys with high performance grinding wheels. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2020, vol. 30, pp. 157-173. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.05.004>
 17. Li G.F., Wang L.S., Yang L.B. Multi-parameter optimization and control of the cylindrical grinding process. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, vol. 129, no. 1-3, pp. 232-236. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00607-6](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00607-6)
 18. Degtyareva-Kashutina A.S., Boldyrev I.S. A mathematical model for determining contact zone temperature during cylindrical plunge grinding. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2022, vol. 20, no. 3, pp. 94-102. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-3-94-102>
 19. Evseev D.G. *Formirovanie svoystv poverkhnostnykh sloev pri abrazivnoy obrabotke* [Forming properties of surface layers during abrasive processing]. Saratov: Publishing House of Saratov University, 1975, 127 p. (In Russ.)
 20. Kalinin E.P. *Teoriya i praktika upravleniya proizvoditelnostyu shlifovaniya bez prizhgov s uchetom zatupleniya instrumenta* [Theory and practice of controlling the performance of grinding without burning, taking into account the tool edge blunting]. Saint Petersburg: Publishing House of Polytechnic University, 2009, 358 p. (In Russ.)
 21. Kadivar M., Azarhoushang B. Cutting temperature and energy partitioning in grinding. *Tribology and fundamentals of abrasive machining processes* (Third Edition). William Andrew Publishing, 2022, pp. 469-505. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823777-9.00002-1>
 22. Li Z., Yao Y., Nakae K., Sasahara H. Temperature measurement of surface grinding using a fluid supplying system from inside of grinding wheel. *Emerg. Technol. Precis. Eng.* XIV, 2012, vol. 523-524, pp. 125-130. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.523-524.125>

23. Yi J., Sheng X.M., Feng C.B. Temperature measurement and simulation in stainless steel high-speed grinding. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, vol. 184, pp. 684-687. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.184-185.684>
24. Li H.N., Axinte D. On a stochastically grain-discretised model for 2D/3D temperature mapping prediction in grinding. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2017, 116, 60-76.
25. Liu D. et al. An in-situ infrared temperature-measurement method with back focusing on surface for creep-feed grinding. *Measurement*, 2016, 94, 645-652.
26. Dai S.J., Li X.Q., Zhang H.B. Research on temperature field of non-uniform heat source model in surface grinding by cup wheel. *Advances in Manufacturing*, 2019, 7 (3), 326-342.
27. Han J. et al. In situ measurement of cutting edge temperature in turning using a near-infrared fiber-optic two-color pyrometer. *Measurement*, 2020, 156, 107595.
28. Hong Y., Xiu S., Sun C., Zhao Y., Zhang X. Metallographic method for temperature measurement: Reconstruction of grinding temperature field based on critical austenitizing depth and cyclic feedback algorithm. *Journal of Materials Processing Technology*, 2022, vol. 310, no. 117770. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.117770>
29. Yi J., Deng Z.H., Zhou W., Li S.J. Numerical modeling of transient temperature and stress in WC-10Co4Cr coating during high-speed grinding. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2020, 21 (4), 585-598.
30. Miao Q., Li H.N., Ding W.F. On the temperature field in the creep feed grinding of turbine blade root: Simulation and experiments. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 147, 118957.
31. Heininen A., Prod'hon R., Mokhtarian H., Coatanéa E., Koskinen K. Finite element modelling of temperature in cylindrical grinding for future integration in a digital twin. *Procedia CIRP*, 2021, vol. 104, pp. 875-880. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.147>
32. Wang Z., Yu T., Wang X., Zhang T., Zhao J., Wen P.H. Grinding temperature field prediction by meshless finite block method with double infinite element. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, vol. 153-154, pp. 131-142. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.01.037>
33. Zhang J. et al. Temperature field model and experimental verification on cryogenic air nanofluid minimum quantity lubrication grinding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 97 (1), 209-228.
34. Chen H. et al. Simulation of 3D grinding temperature field by using an improved finite difference method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 108, (11), 3871-3884.
35. Ostrovsky V.I. *Teoreticheskie osnovy protsessy shlifovaniya* [Theory of a grinding process]. Leningrad: Publishing House of Leningrad University, 1981, 144 p. (In Russ.)

Поступила 05.10.2022; принята к публикации 14.10.2022; опубликована 22.12.2022
Submitted 05/10/2022; revised 14/10/2022; published 22/12/2022

Дегтярева-Кашутина Анастасия Сергеевна – старший преподаватель,
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: asdegyareva24@gmail.com. ORCID 0000-0002-4236-9207

Болдырев Игорь Станиславович – кандидат технических наук, доцент,
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: boldyrev@susu.ru.

Anastasia S. Degtyareva-Kashutina – Senior Lecturer,
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: asdegyareva24@gmail.com. ORCID 0000-0002-4236-9207

Igor S. Boldyrev – PhD (Eng.), Associate Professor,
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: boldyrev@susu.ru.

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

NEW TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.98.042
DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-4-120-128



ИССЛЕДОВАНИЕ НАЧАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ДРОБЬЮ

Пашков А.Е., Пашков А.А., Самойленко О.В.

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Одними из наиболее сложных элементов в конструкции самолета являются крупногабаритные обводообразующие панели и обшивки. Сложность изготовления объясняется специфической пространственной формой – сочетанием участков знакопеременной двойной кривизны в совокупности с большими габаритными размерами (длина таких деталей может достигать 30 м) и малой жесткостью. Эффективным подходом к получению формы двойной кривизны является использование методов поверхностного пластического деформирования – обработки дробью и методов локальной обработки – раскатки и посадки ребер. Большинство методик для определения режимных параметров процесса строятся на экспериментальных исследованиях кривизны и удлинения образцов в процессе обработки, а также на основе теории упругости в области исследования остаточных напряжений. **Цель работы.** Совершенствование методик расчета режимных параметров обработки металлов методами поверхностного пластического деформирования. **Используемые методы.** Конечно-элементное моделирование процесса поверхностного пластического деформирования на примере обработки дробью. **Новизна.** Использование концепции начальных напряжений, являющихся источником изгибной деформации и деформации удлинения для описания процесса обработки дробью. **Результаты.** Разработана методика определения распределений начального напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя элементарных участков деталей. Разработана методика интеграции начального напряженно-деформированного состояния в поверхностный слой натурных деталей с целью получения прогнозируемой кривизны деталей в требуемом направлении. Сопоставлены результаты моделирования с имеющимися результатами экспериментальных исследований по обработке образцов пластинок методом дробеударного формообразования. **Практическая значимость.** Использование подхода начальных напряжений для описания процесса обработки дробью обеспечивает возможность расчета режимных параметров процесса, отказавшись от большого числа экспериментальных исследований. С применением методов компьютерного моделирования решен комплекс задач, направленных на повышение эффективности производства обводообразующих деталей сложной формы и их качества за счёт раскрытия закономерностей формирования напряженно-деформированного состояния при обработке деталей.

Ключевые слова: поверхностное пластическое деформирование, обработка металлов давлением, остаточные напряжения, начальные напряжения, напряженно-деформированное состояние

Работа выполнена в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

© Пашков А.Е., Пашков А.А., Самойленко О.В., 2022

Для цитирования

Пашков А.Е., Пашков А.А., Самойленко О.В. Исследование начальных напряжений процесса обработки дробью // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №4. С. 120-128. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-120-128>



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

DEVELOPMENT OF INITIAL STRESSES DURING SHOT PEENING

Pashkov A.E., Pashkov A.A., Samoylenko O.V.

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). One of the most complicated elements in the plane design is large-size outer mold line panels and shell. Manufacturing complexity is attributed to a peculiar spatial outline, namely a combination of zones of fluctuating double curvature and large size (length of such parts may be 30 m) and low stiffness. An efficient approach to manufacturing a double curvature shape is surface plastic deformation methods, namely shot peening and local treatment (flattening-out and fitting of edges). Most methods used to determine mode parameters of the processes are based on experimental studies on curvature and elongation of samples during treatment, and elasticity theory in studies on residual stresses. **Objectives.** The research is aimed at improving the methods used to calculate mode parameters of metal forming by surface plastic deformation. **Methods Applied.** finite element modeling of the surface plastic deformation process using shot peening as an example. **Originality.** It lies in using a concept of initial stresses, being a source of bending strain and extensional strain, to describe a shot peening processes. **Results.** The authors developed methods for determining the distributions of the initial stress-strain state of the surface layer of element sections of parts, and for integrating the initial stress-strain state into the surface layer of full-scale parts in order to obtain the predicted curvature of the parts in the required direction. The simulation results were compared with the available results of experimental studies on the processing of plate samples by the shot peening method. **Practical Relevance.** An approach of initial stresses applied to describe the shot peening process contributes to calculating mode parameters of the processes, showing no need for a large number of experimental studies. Computer simulation methods were applied to settle a range of issues aimed at increasing efficiency and quality of manufacturing outer mold line parts of a complicated shape by finding patterns of forming the stress-strain state, when processing parts.

Keywords: surface plastic deformation, metal forming, residual stresses, initial stresses, stress-strain state

The research has been carried out within the framework of the strategic academic leadership program "Priority 2030".

For citation

Pashkov A.E., Pashkov A.A., Samoylenko O.V. Development of Initial Stresses During Shot Peening. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 4, pp. 120-128. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-120-128>

Введение

В современном авиастроении в качестве обводообразующих элементов широко используются панели, которые могут представлять собой сборные конструкции в виде обшивки с присоединёнными, в основном клёпкой, элементами силового набора, а также монолитно-фрезерованные панели, изготавливаемые из плит или специальных профилей. Применение панелей определено повышением прочности и жесткости конструкции, а также улучшением аэродинамических характеристик. За счет изготовления панелей максимально возможной длины и, соответственно, уменьшения количества крепёжных деталей и поперечных швов снижается общая масса крыла [1, 2].

Пространственная форма панелей представляет сочетание линейчатых поверхностей и поверхностей с участками кривизны и круткой се-

чений (рис. 1). Как правило, кривизна является переменной величиной от одного сечения детали к другому и может иметь разный знак [3, 4].

Требуемая точность геометрической формы обводообразующих деталей характеризуется допустимыми отклонениями пространственной формы от теоретического контура, лежащими в пределах 0,1-1 мм [5].

Основными методами формообразования таких деталей являются гибка различными способами (на прессовом оборудовании, гибка-прокатка, гибка с растяжением), раскатка и обработка дробью [6-9]. Наиболее перспективным направлением является дробеударное формообразование (ДУФ), так как наряду с достижением высокой точности деталей дробеобработка позволяет увеличить производительность процесса и реализовать эффект упрочнения, повышающий усталостную прочность и долговечность деталей [10].

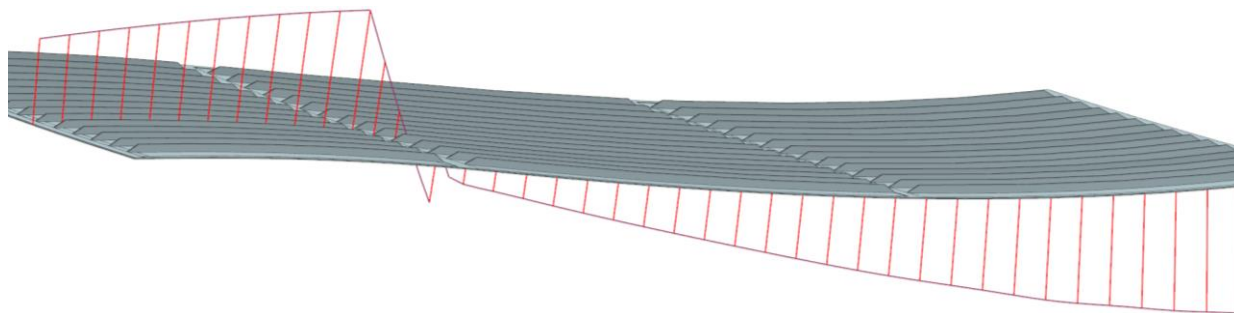


Рис. 1. Трехмерная модель типовой панели с графическим отображением распределений продольной (относительно ребер) кривизны

Fig. 1. Three-dimensional model of a typical panel, showing the distributions of the longitudinal (relative to the edges) curvature

Наиболее удобным подходом к цифровизации производства является создание конечно-элементных моделей процесса обработки, позволяющих достаточно подробно изучить свойства объектов во время процесса формообразования.

Актуальность темы исследования формируется исходя из высоких требований к точности изготавливаемых крупногабаритных обводообразующих деталей сложной формы с областью двойной кривизны, обработка которых является весьма трудоемкой из-за высокой жесткости конструкции. Для повышения точности формообразования деталей необходимо наиболее точно подбирать режимы обработки для различных деталей, учитывая специфику обработки. Для этого следует разрабатывать новые или совершенствовать существующие подходы к цифровизации производства. Целью данной работы является совершенствование методик расчета режимных параметров обработки металлов методами поверхностного пластического деформирования на основе конечно-элементного моделирования.

Исследование напряженно-деформированного состояния в поверхностном слое детали после обработки дробью

В основе формообразования дробью лежит поверхностное пластическое деформирование (ППД) детали обработкой дробью, что приводит к формированию остаточного напряженно-деформированного состояния. Оценка остаточного напряженно-деформированного состояния детали после дробеобработки – один из основных подходов к определению режимных параметров процесса.

В основе определения остаточных напряжений лежит известная в теории пластичности теорема Генки о разгрузке, согласно которой остаточные напряжения равны разности между ис-

тинными напряжениями в упругопластическом теле и теми напряжениями, которые создавались бы в нем при предположении об идеальной упругости тела [11]. Теорема позволяет определить остаточные напряжения, когда известно напряженное состояние детали в стадии нагружения. Использование данной теоремы позволяет определить общую деформацию детали, а в случае конечно-элементного моделирования – найти перемещения узлов сетки модели после пластической деформации.

Общая деформация детали, возникшая вследствие поверхностной деформации, фазовых превращений и других причин названа И.А. Биргером первоначальной, а образование остаточных напряжений – это процесс уравнивания напряжений, соответствующих первоначальной деформации по силе и моменту. Данные напряжения в [12] названы начальными, их величина соответствует отклонениям от интегральных по сечению значений, определяемых уравнениями равновесия. Для математического представления процесса формоизменения используют подход, основанный на этом понятии.

В случае изгиба, вызванного ППД пластины конечной толщины, остаточные напряжения выражают как сумму начальных, нескомпенсированных напряжений и напряжений, возникающих в сечении детали от внутренней силы и изгибающего момента, вызывающих деформацию тела. Эпюра остаточных напряжений σ^0 может быть найдена алгебраическим суммированием эпюры начальных напряжений σ^H , эпюры от осевой силы σ_p и эпюры от изгибающего момента σ_M (рис. 2, а). Если же рассмотреть результаты ППД полупространства в виде эпюры остаточных напряжений, характерной для процессов резания, дробеударной

обработки и т.д. (эпюра 3 на **рис. 2, б**), увидим, что данная эпюра является неуравновешенной, что очевидно для данного случая. Для нахождения эпюры 1 начальных напряжений необходимо вычесть из результирующей эпюры 3 эпюру 2 реактивных упругих напряжений, которую можно найти по известным координатам точек *A* и *B*, лежащих на прямой *BC*.

Для определения параметров эпюры начальных напряжений на основе известной эпюры остаточных напряжений возможно использовать следующие выражения:

$$\sigma_{\Pi}^H = \sigma_{\Pi}^O + \sigma_{\Pi}^{упр} = \sigma_{\Pi}^O + \sigma' \left(1 + \frac{h_{\Pi\Pi}}{h_{упр} - h_{\Pi\Pi}} \right); \quad (1)$$

$$\sigma_s^H = \sigma_s^O + \sigma_s^{упр} = \sigma_s^O + \sigma' \left(1 + \frac{h_s - h_{\Pi\Pi}}{h_{упр} - h_{\Pi\Pi}} \right). \quad (2)$$

Одним из наиболее точных методов исследования остаточного напряженно-деформированного состояния при обработке дробью является метод конечных элементов. Данное направление активно развивается и включает значительное количество работ, начиная от единичного внедрения сферического индентора [13] и заканчивая

моделированием множественных внедрений дроби с целью воссоздания степеней покрытия [14].

Исследования, изложенные в данной работе, являются продолжением работ, проводимых ФГБОУ ВО «ИрНИТУ» в области исследования процессов обработки деталей методами поверхностного пластического деформирования [15, 16] и используют методики моделирования обработки дробью (режимные параметры: частота вращения дробеметного колеса 800 об/мин; подача дробемета относительно образца – 2000 мм/мин).

Конечно-элементные модели обработки дробью диаметром 3,5 мм из материала ШХ15, применяемого для формообразования авиационных деталей из алюминиевых сплавов, показаны на **рис. 3**. Исходя из схемы, предложенной на **рис. 2**, в случае если ограничить возможность возникновения осевой силы и изгибающего момента, то есть зафиксировать деталь, то остаточные напряжения можно приравнять к начальным. Следовательно, соотношение размеров обрабатываемой детали к размерам области обработки можно использовать в соотношении 1:1, так как деформации детали при ее периферийном закреплении не происходит, что подтверждается результатами моделирования.

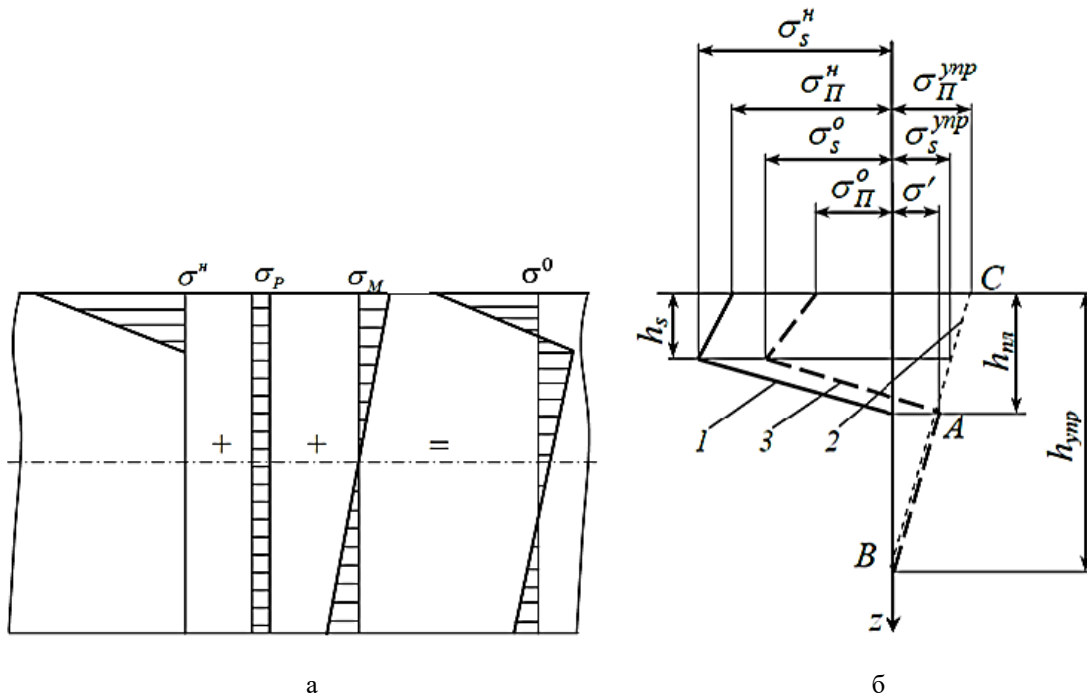
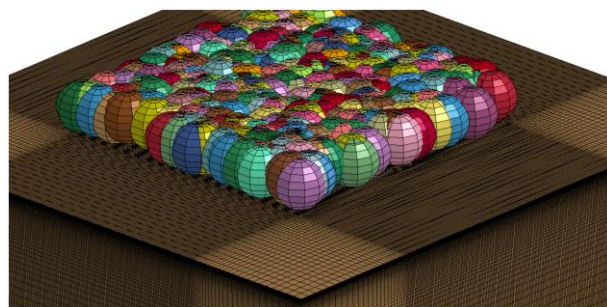
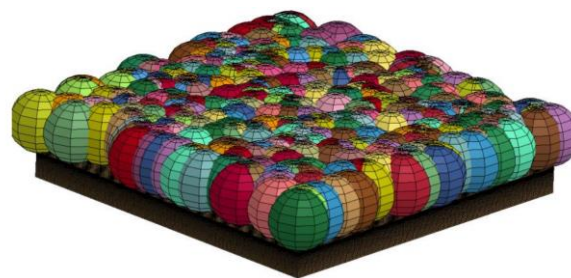


Рис. 2. Схема определения остаточных напряжений: 1 – начальные напряжения; 2 – реактивные напряжения σ_R в слоях металла, прилегающих к очагу деформации; 3 – остаточные напряжения

Fig. 2. Scheme for determining residual stresses: 1 is initial stresses; 2 is reactive stresses σ_R in metal layers adjacent to the deformation zone; 3 is residual stresses



а



б

Рис. 3. Конечно-элементные модели для определения начальных напряжений: а – размеры заготовки 40×40×40 мм (при области обработки 20×20 мм); б – размеры заготовки 21×21×2 мм (при области обработки 20×20 мм)

Fig. 3. Finite element models for determining the initial stresses: а is a workpiece of 40×40×40 mm in size (when a processing area is 20×20 mm); б is a workpiece of 21×21×2 mm (when a processing area is 20×20 mm)

Результаты моделирования в виде распределений напряжений и деформаций относительно трех ортогональных осей представлены на **рис. 4**. Полученные результаты могут быть использованы для определения параметров аппроксимированной эпюры начальных напряжений согласно схеме, показанной на **рис. 2**.

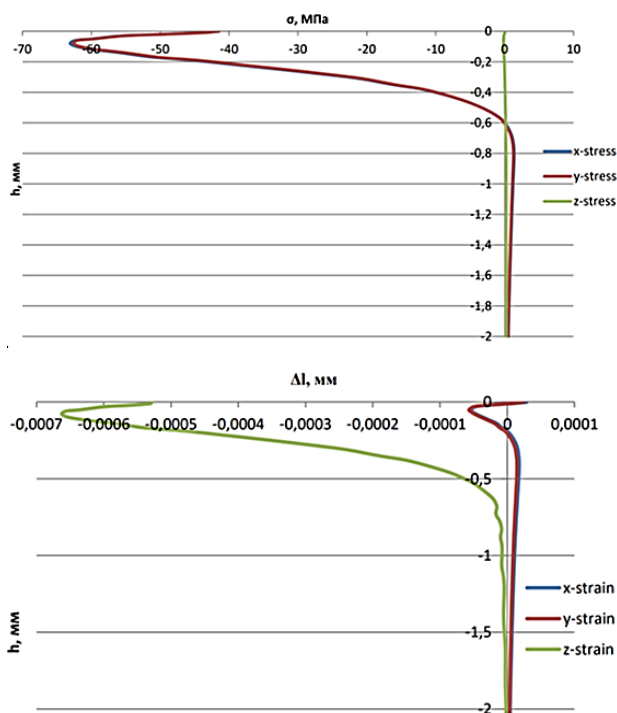


Рис. 4. Распределения остаточных (начальных) напряжений σ и деформаций ϵ после множественных внедрений дроби в участок образца с ограничением свободы при закреплении

Fig. 4. Distributions of residual (initial) stresses σ and strains ϵ after multiple shots in the sample area with constraints during fixing

Как видно из представленных иллюстраций, распределения остаточных напряжений, характеризуются следующими параметрами: $\sigma_{\Pi}^H = 42,4$ МПа; $\sigma_s^H = 64,1$ МПа; $h_{\text{упр}} = 1,9$ мм; $h_{\text{пл}} = 0,60$ мм.

Исследование формоизменения детали при интеграции начальных напряжений, возникающих при обработке дробью, в поверхностный слой детали

Большинство работ, посвященных моделированию формоизменения детали в процессе обработки дробью, использует подход, основанный на нагружении детали интегральными силовыми факторами процесса, – растягивающими силами, приложенными на определённой глубине от поверхности [17-21]. Такой подход отличается набором определённых ограничений, а именно не учитывается неравномерность интегрированной эпюры по глубине, что приводит к снижению точности получаемых результатов.

Предлагаемый метод конечно-элементного моделирования, основанный на воссоздании напряженно-деформированного состояния при обработке дробью в поверхностном слое детали, подразумевает дискретизацию сетки детали по глубине слоя, в пределах которого действуют начальные напряжения (**рис. 5**).

Используя интерфейс программы Ansys LS-Dyna, создается модель детали (плоский параллелепипед) размерами 250×30×4 мм, в которую будет вноситься начальное напряженно-деформированное состояние. Конечно-элементная сетка данной детали делится на две части: уточненную сетку и разряженную. Для интеграции начального

напряженно-деформированного состояния в поверхностный слой необходимо послойно создать группы элементов для всего поверхностного слоя. Затем для соответствующих групп узлов указываются значения трех компонент напряжений и деформаций относительно принятой декартовой системы координат.

Таким образом формируется конечно-элементная сетка с напряженным поверхностным слоем (рис. 6).

В результате расчета начальные напряжения в детали перераспределяются и вызывают действие, эквивалентное приложению осевой силы и изгибающего момента, что приводит к общей изгибной деформации детали. На рис. 7 показаны результаты расчета после перераспределения начальных напряжений и перехода в остаточное напряженно-деформированное состояние в виде распределений перемещений относительно трех декартовых осей.

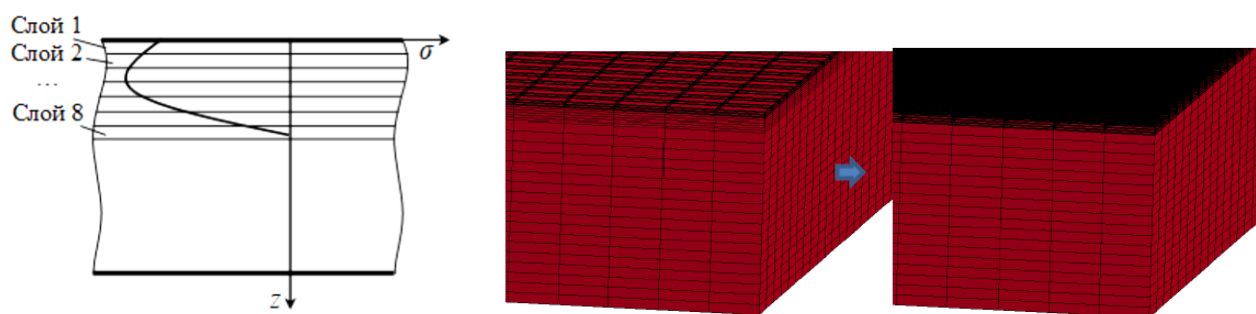


Рис. 5. Дискретизация распределения начального напряженно-деформированного состояния

Fig. 5. Discretization of the distribution of the initial stress-strain state

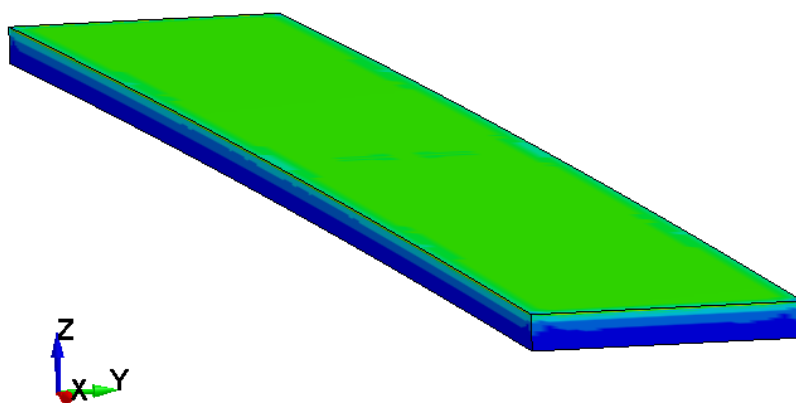


Рис. 6. Конечно-элементная сетка с напряженным поверхностным слоем

Fig. 6. Finite element mesh with a stressed surface layer

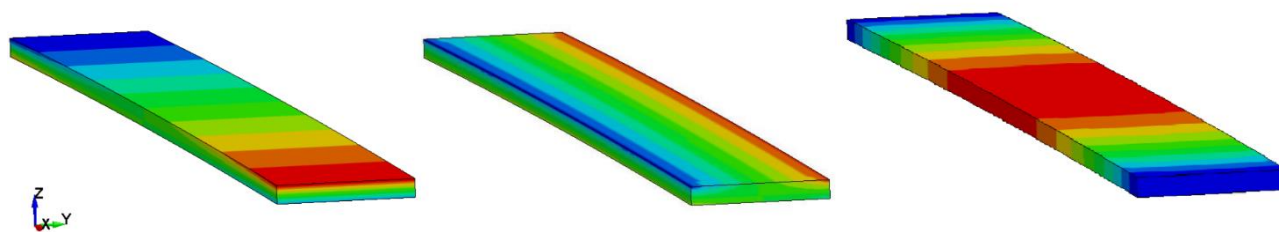


Рис. 7. Распределения перемещений узлов детали относительно осей X, Y, Z соответственно

Fig. 7. Distributions of displacements of workpiece nodes relative to the X, Y, Z axes, respectively

Экспериментальная проверка результатов моделирования

Для проверки результатов моделирования были проведены экспериментальные исследования обработки образцов пластин размерами 4×30×250 мм из материала В95пчТ2, используемого при моделировании на установке УДФ-4 на Иркутском авиационном заводе – филиале ПАО «Корпорация “Иркут”». Механические свойства пластин для контроля процесса дробеударной обработки: временное сопротивление – 530 МПа; предел текучести – 460 МПа; относительное удлинение – 7%; твердость – 150 МПа. В качестве рабочего органа использовался дробеметный аппарат ЗД400м. Режимы обработки были выбраны согласно модели.

Критерием оценки была стрела прогиба образца после обработки, измеряемая микронной индикаторной планкой.

Расхождения экспериментальных данных и результатов моделирования не превысили 10%, что позволяет судить об адекватности разработанной методики моделирования процессов дробеударного формообразования методом интеграции начального напряженно-деформированного состояния в поверхностный слой детали.

Заключение

Разработанная методика позволяет определять формоизменение деталей таких типов поверхностного пластического деформирования и локального деформирования, как обработка дробью, дробеметное упрочнение, раскатка / посадка / разводка подкрепляющих конструктивных элементов и другие виды механической обработки. Входными данными для проведения расчетов, связанных с определением формоизменения детали, являются распределения начальных компонент напряжений и деформаций, определяемых по результатам конечно-элементного единичного моделирования рассматриваемых процессов.

Список источников

1. Makaruk A.A., Pashkov A.A., Samoylenko O.V. Increasing the shape accuracy of the hardened parts of the frame by technological methods // *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2019. Vol. 632. DOI: 10.1088/1757-899X/632/1/012100.
2. Pashkov A.E., Malashchenko A.Y., Pashkov A.A. On Creating Digital Technologies for the Production of Large Aircraft Frame and Skin Parts // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2021. Vol. 2021. No 13. P. 1777-1785. DOI: 10.1134/S003602952113022X.
3. Pashkov A.E., Malashchenko A.Y., Pashkov A.A., Bogdanov K.V., Kryuchkin A.V. Development of digital manufacturing technologies for frame and casing parts // *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2019. Vol. 632. DOI: 10.1088/1757-899X/632/1/012104.
4. Pashkov A.E., Malashchenko A.Y., Pashkov A.A., Duk A.A. The upgrade of peen forming equipment for long-sized aircraft parts // *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2021. Vol. 1061. DOI: 10.1088/1757-899X/1061/1/012029.
5. Koltsov V.P., Vinh Le Tri, Starodubtseva D.A. Determination of the allowance for grinding with flap wheels after shot peen forming // *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2019. Vol. 632. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/632/1/012096>.
6. Беляков В.И. Штамповка на специальном оборудовании. М.: Машгиз, 1983. 79 с.
7. Охрименко Я.М. Основы технологии горячей штамповки. М.: Машгиз, 1975. 285 с.
8. Макарук А.А., Минаев Н.В. Технология формообразования и правки малоожестких деталей методами местного пластического деформирования // *Материалы Всерос. науч.-практ. семинара с междунар. участием*. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2011. С. 117-121.
9. Макарук А.А., Минаев Н.В. Технология формообразования и правки малоожестких деталей раскаткой роликами // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2013. Т. 15. №6. С. 404-408.
10. Кравченко Г.Н. Обоснование эффективности восстановления усталостной долговечности поверхностно-упрочненных авиационных деталей повторным упрочнением дробью // *Вестник машиностроения*. 2019. №12. С. 69-75.
11. Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: Машгиз, 1963. 232 с.
12. Исаев А.И., Овсенко А.Н. Выбор оптимальной толщины образца при определении остаточных напряжений в поверхностном слое // *Вестник машиностроения*. 1967. № 8. С. 74-76.
13. К определению внутренних силовых факторов процесса дробеударного формообразования / Пашков А.Е., Чапышев А.П., Пашков А.А., Викулова С.В., Андрияшина Ю.С. // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2017. Т. 21. №12. С. 43-54. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-12-43-55.
14. Ramati S., Levasseur G., Kennerknecht S. Single piece wing skin utilization via advanced peen forming technology // *7-th Int. Conf. on Shot Peening*. Warsaw, Poland, 28-30 Sept. 2000. P. 1-18. С. 1528-1535.
15. Дияк А.Ю. Определение степени покрытия автоматизированным методом // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2015. №12. С. 19-25.
16. Koltsov V.P., Vinh Le Tri, Starodubtseva D.A. Surface roughness formation during shot peen forming // *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2019. Vol. 632. DOI: 10.1088/1757-899X/632/1/012096.

- rials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2018. Vol. 327. Iss. 4. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/4/042125>.
17. Макарук А.А., Минаев Н.В. Повышение эффективности формообразования и правки мало жестких подкрепленных ребрами деталей раскаткой роликами // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. №12(107). С. 63-70.
 18. Murugaratnam K., Utili S., Petrinic N. A combined DEM-FEM numerical method for Shot Peening parameter optimization // Advances in Engineering Software. 2015. Vol. 79. P. 13-26. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2014.09.001>.
 19. Miao H.Y., Larose S., Perron C., Evesque M. On the potential applications of a 3D random finite element model for the simulation of shot peening // Advances in Engineering Software. 2009. Vol. 40. No. 10. P. 1023-1038. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2009.03.013>.
 20. Chen Zhuo, Yang Fan, Meguid S.A. Realistic finite element simulations of arc-height development in shotpeened Almen strips // Journal of Engineering Materials and Technology. 2014. Vol. 136. No. 4. <https://doi.org/10.1115/1.4028006>.
 21. Tu Fubin, Delbergue D., Miao Hongyan, Klotz T., Brochu M., Bocher P, et al. A sequential DEM-FEM coupling method for shot peening simulation // Surface and Coatings Technology. 2017. Vol. 319. P. 200-212. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.03.035>.
- ### References
1. Makaruk A.A., Pashkov A.A., Samoylenko O.V. Increasing the shape accuracy of the hardened parts of the frame by technological methods. Materials Science and Engineering: IOP Conference Series, 2019, 632. DOI: 10.1088/1757-899X/632/1/012100
 2. Pashkov A.E., Malashchenko A.Y., Pashkov A.A. On creating digital technologies for the production of large aircraft frame and skin parts. Russian Metallurgy (Metally), 2021, 2021, 13, 1777-1785. DOI: 10.1134/S0036029521113022X
 3. Pashkov A.E., Malashchenko A.Y., Pashkov A.A., Bogdanov K.V., Kryuchkin A.V. Development of digital manufacturing technologies for frame and casing parts. Materials Science and Engineering: IOP Conference Series, 2019, 632. DOI: 10.1088/1757-899X/632/1/012104
 4. Pashkov A.E., Malashchenko A.Y., Pashkov A.A., Duk A.A. The upgrade of peen forming equipment for long-sized aircraft parts. Materials Science and Engineering: IOP Conference Series, 2021, 1061. DOI: 10.1088/1757-899X/1061/1/012029
 5. Koltsov V.P., Vinh Le Tri, Starodubtseva D.A. Determination of the allowance for grinding with flap wheels after shot peen forming. Materials Science and Engineering: IOP Conference Series, 2019, 632. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/632/1/012096>
 6. Belyakov V.I. *Shtampovka na spetsialnom oborudovanii* [Stamping on special equipment]. Moscow: Mashgiz, 1983, 79 p. (In Russ.)
 7. Okhrimenko Ya.M. *Osnovy tekhnologii goryachey shtampovki* [Basics of die forging technology]. Moscow: Mashgiz, 1975, 285 p. (In Russ.)
 8. Makaruk A.A., Minaev N.V. Technology of shaping and straightening of low-rigidity parts by local plastic deformation methods. *Materialy Vserossiiskogo nauchno-prakticheskogo seminar s mezhdunarodnym uchastiem* [Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Workshop with an international participation]. Irkutsk: Irkutsk State Technical University, 2011, pp. 117-121. (In Russ.)
 9. Makaruk A.A., Minaev N.V. Technology of shaping and straightening of low-rigidity parts by means of roller burnishing. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk* [Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2013, vol. 15, no. 6, pp. 404-408. (In Russ.)
 10. Kravchenko G.N. Rationale for efficiency of restoring the fatigue life of surface hardened aircraft parts by repeated shot peening. *Vestnik mashinostroeniya* [Bulletin of Mechanical Engineering], 2019, no. 12, pp. 69-75. (In Russ.)
 11. Birger I.A. *Ostatochnye napryazheniya* [Residual stresses]. Moscow: Mashgiz, 1963, 232 p. (In Russ.)
 12. Isaev A.I., Ovseenko A.N. Selecting optimal thickness of samples for determining residual stresses in the surface layer. *Vestnik mashinostroeniya* [Bulletin of Mechanical Engineering], 1967, no. 8, pp. 74-76. (In Russ.)
 13. Pashkov A.E., Chapyshev A.P., Pashkov A.A., Vikulova S.V., Andryashina Yu.S. Determination of internal force factors of the shot peening process. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2017, vol. 21, no. 12, pp. 43-55. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-12-43-55
 14. Ramati S., Levasseur G., Kennerknecht S. Single piece wing skin utilization via advanced peen forming technology. The 7th Int. Conf. on Shot Peening, Warsaw, Poland, 28-30 Sept. 2000, p. 1-18, pp. 1528-1535.
 15. Diyak A.Yu. Shot coverage degree estimation by a computer-aided method. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2015, no. 12, pp. 19-25. (In Russ.)
 16. Koltsov V.P., Vinh Le Tri, Starodubtseva D.A. Surface roughness formation during shot peen forming. Materials Science and Engineering: IOP Conference Series., 2018, 327(4). DOI: 10.1088/1757-899X/327/4/042125
 17. Makaruk A.A., Minaev N.V. Improving efficiency of low-rigid ribbed parts forming and straightening by roller burnishing. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2015, no. 12 (107), pp. 63-70. (In Russ.)
 18. Murugaratnam K., Utili S., Petrinic N. A combined DEM-FEM numerical method for shot peening parameter optimization. Advances in Engineering Software, 2015, 79, 13-26. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2014.09.001>

19. Miao H.Y., Larose S., Perron C., Evesque M. On the potential applications of a 3D random finite element model for the simulation of shot peening. *Advances in Engineering Software*, 2009, 40(10), 1023-1038. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2009.03.013>
20. Chen Zhuo, Yang Fan, Meguid S.A. Realistic finite element simulations of arc-height development in shot-peened Almen strips. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 2014, 136 (4). <https://doi.org/10.1115/1.4028006>
21. Tu Fubin, Delbergue D., Miao Hongyan, Klotz T., Brochu M., Bocher P. et al. A sequential DEM-FEM coupling method for shot peening simulation. *Surface and Coatings Technology*, 2017, 319, 200-212. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.03.035>

Поступила 10.10.2022; принята к публикации 02.11.2022; опубликована 22.12.2022

Submitted 10/10/2022; revised 02/11/2022; published 22/12/2022

Пашков Андрей Евгеньевич – доктор технических наук, профессор кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия.
E-mail: pashkov@istu.edu.

Пашков Александр Андреевич – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия.
E-mail: pashk0ff@mail.ru.

Самойленко Олег Викторович – научный сотрудник кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия.
E-mail: olegsamoylenko1@gmail.com.

Andrey E. Pashkov – DrSc (Eng.), Professor of the Department of Machine-Building Production Technology and Equipment, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.
Email: pashkov@istu.edu.

Aleksandr A. Pashkov – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Machine-Building Production Technology and Equipment, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.
Email: pashk0ff@mail.ru.

Oleg V. Samoylenko – Researcher of the Department of Machine-Building Production Technology and Equipment, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.
Email: olegsamoylenko1@gmail.com.

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.9.042
DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-4-129-136



ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ФОРМЫ ОТВЕРСТИЙ В СОСТАВНЫХ ДЕТАЛЯХ

Козлов А.В.¹, Дерябин И.П.¹, Верещагин В.С.¹, Платов С.И.², Кургузов С.А.²,
Терентьев Д.В.², Звягина Е.Ю.²

¹ Филиал Южно-Уральского государственного университета (НИУ), Златоуст, Россия

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

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). В конструкциях машин возможно применение составных деталей с отверстием. Наличие в заготовке отверстия треугольной или квадратной формы приводит к образованию соответствующих погрешностей формы при последующей обработке в связи с «копированием» этих погрешностей на стадиях черновой, полуставовой и чистовой обработок. Основной задачей является обеспечение точности обработки отверстий в составных деталях, так как в дальнейшем отверстие используется в качестве основной конструкторской базы для различных соединений, вставок и других элементов узлов и механизмов. **Используемые методы.** Анализ причин образования огранки отверстий с помощью системы математических моделей радиально-статического типа. Экспериментальное опробирование результатов расчетов при обработке отверстий с помощью концевых мерных осевых режущих инструментов. **Новизна.** Разработана система математических моделей для процессов формообразования точных отверстий в составных деталях инструментами одностороннего резания, к которым относятся ружейные сверла и зенкеры. Результаты расчетов процессов сверления и зенкерования по данным моделям позволили уточнить углы расположения опорных кулачков ружейного сверла и показали, что последующее применение 3-лезвийного зенкера позволяет существенно уменьшить погрешность формы формируемого отверстия. **Результат.** Предложены мероприятия, направленные на устранение недостатков существующего технологического процесса и применяемого режущего инструмента, такие как применение кондукторной втулки, изменение конструкции и геометрических параметров рабочей части режущего инструмента. Это позволило формировать более точные отверстия. **Практическая значимость.** Разработаны мероприятия, направленные на повышение точности сборочного соединения с использованием составных деталей.

Ключевые слова: составная деталь, точность формы отверстия, математическая модель, концевые мерные инструменты

© Козлов А.В., Дерябин И.П., Верещагин В.С., Платов С.И., Кургузов С.А.,
Терентьев Д.В., Звягина Е.Ю., 2022

Для цитирования

Повышение точности формы отверстий в составных деталях / Козлов А.В., Дерябин И.П., Верещагин В.С., Платов С.И., Кургузов С.А., Терентьев Д.В., Звягина Е.Ю. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №4. С. 129-136. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-129-136>



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

IMPROVEMENT OF HOLE SHAPE ACCURACY IN COMPOSITE PARTS

Kozlov A.V.¹, Deryabin I.P.¹, Vereshchagin V.S.¹, Platov S.I.², Kurguzov S.A.²,
Terentev D.V.², Zvyagina E.Yu.²

¹ Branch of South Ural State University (National Research University), Zlatoust, Russia

² Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). Machine designs may contain composite parts with a hole. A triangular or square hole in the blank leads to corresponding shape errors during subsequent processing due to the “copying” of these errors at roughing, semi-finishing and finishing stages. A main objective is to ensure the accuracy of processing holes in composite parts, since the hole is then used as a main assembly base for various connections, inserts and other elements of assemblies and mechanisms. **Methods Applied:** Analysis of the reasons for hole faceting using a system of radial-static mathematical models. Experimental testing of the calculation results in the processing of holes using measurement rotary end-cutting tools. **Originality:** A system of mathematical models has been developed for the processes of forming holes with single-sided cutting tools, which include gun drills and countersinks. The calculations of drilling and countersinking processes according to these models made it possible to clarify the angles of location of the support cams of the gun drill and showed that the subsequent use of a 3-blade countersink significantly reduced the error in the shape of the hole being formed. **Result.** The authors proposed measures aimed at eliminating disadvantages of the existing technological process and the cutting tool used, such as the use of a drill bushing, changing the design and geometric parameters of the working part of the cutting tool. This contributed to forming more accurate holes. **Practical Relevance.** The measures have been developed to improve the accuracy of the assembly unit consisting of composite parts.

Keywords: composite part, hole shape accuracy, mathematical model, end measurement tools

For citation

Kozlov A.V., Deryabin I.P., Vereshchagin V.S., Platov S.I., Kurguzov S.A., Terentyev D.V., Zvyagina E.Yu. Improvement of Hole Shape Accuracy in Composite Parts. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 4, pp. 129-136. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-129-136>

Введение

В настоящее время в действующем производстве изготавливают несколько типоразмеров деталей, характерной особенностью которых является их сборка из нескольких секторов (трех или четырех) и образованное в центре трех- или четырехгранное отверстие (рис. 1). Наличие в заготовке отверстия треугольной или квадратной формы приводит к образованию соответствующих погрешностей формы при последующей обработке в связи с «копированием» этих погрешностей на стадиях черновой, получистовой и чистовой обработок [1]. Изучаемые процессы изготовления составных деталей в машиностроении встречаются нечасто, поэтому в технической литературе недостаточно информации по данной проблеме.

Цель исследования – провести теоретические и экспериментальные исследования процесса формирования отверстий при изготовлении со-

ставных деталей. На основе анализа результатов предложить технологию процесса обработки и обосновать изменения в конструкции режущих инструментов, которые позволят повысить точность формы отверстий.

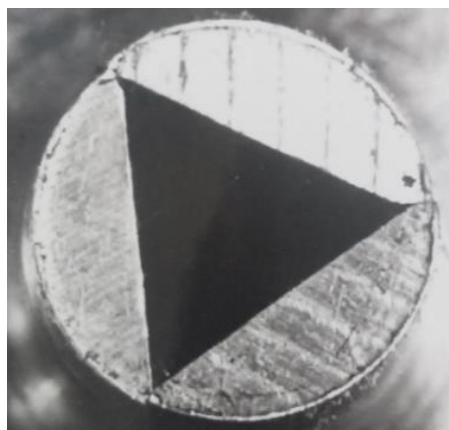


Рис. 1. Фотография трехгранного отверстия в заготовке

Fig. 1. A triangular hole in the workpiece

Полученные результаты и их обсуждение

Технологический процесс обработки таких отверстий будет рассмотрен на примере конкретной детали, составленной из трех секторов. Существующий технологический процесс обработки отверстий включает в себя следующие технологические переходы [2, 3]:

1. Засверливание отверстия на длину 20-30 мм спиральным сверлом.
2. Сверление «на проход» ружейным сверлом с углами расположения опорных кулачков 90 и 180°.
3. Предварительное зенкерование отверстия ружейным зенкером.
4. Окончательная расточка отверстия резцом (для коротких деталей) или зенкерование трёх- и четырёхлезвийным зенкером (для длинных деталей).

При обработке деталей по существующему техпроцессу уже на первом переходе – сверление на проход – возникают:

- огранка отверстия после сверления в пределах 1-2 мм, что подтверждается круглограммой (рис. 2, а);
- значительные уводы и искривление оси отверстия, что было зафиксировано непрохождением в отверстии калибра на прямолинейность и наличием разностенности на выходе из отверстия;
- разбивка отверстия (увеличение диаметра), о чем свидетельствуют измерения диаметра и контроль предельными калибрами.

Последующая обработка зенкерованием и растачиванием показывает, что происходит некоторое уменьшение погрешности формы (огранки), но все же эта погрешность остается значительной (рис. 2). Погрешности гладкого

отверстия копируются в процессе последующего резбонарезания резцом или метчиком. А это, в свою очередь, сказывается на качестве сборки готовой продукции и ее эксплуатационных показателях [4-8].

Для описания и выявления основных закономерностей формообразования отверстий инструментами различных типов была разработана система математических моделей радиально-статического типа [3, 4]. В частности, процессы обработки двухлезвийными инструментами, например спиральными сверлами, могут быть описаны уравнениями вида

$$A \cdot p(\psi) = -p(\psi - \pi) + C, \quad (1)$$

$$A = 1 + \frac{S}{2n} \cdot \tan \varphi + \frac{\tau}{h} \cdot \frac{K_2 - K_1}{K_2 + K_1}, \quad (2)$$

$$C = \tan \varphi \cdot \left(\frac{S}{2} \cdot \frac{K_2 - K_1}{K_2 + K_1} + \tau \right), \quad (3)$$

где $p(\psi)$ – радиус-вектор вершины режущего лезвия, мм; S – осевая подача, мм/об; φ – главный угол в плане лезвий, град; h – глубина резания, мм; ψ – текущий угол поворота инструмента, град; τ – осевое биение режущих кромок инструмента или осевой сдвиг вершин режущих кромок, мм; n – количество колебаний за 1 оборот детали; K_1 и K_2 – коэффициенты пропорциональности сил резания площадям срезаемого слоя (для ружейного сверла соответствующий коэффициент можно считать близким к ∞).

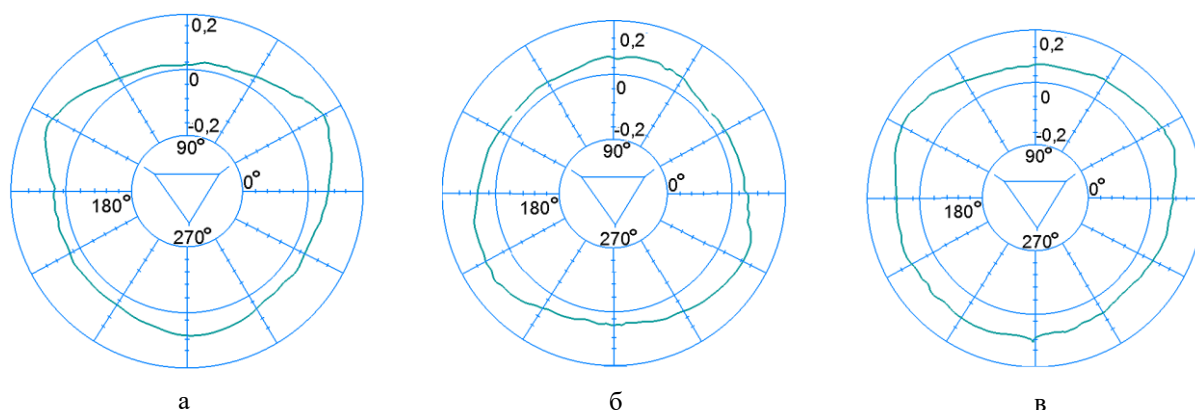


Рис. 2. Образование огранки отверстия (а) и ее технологическое наследование после зенкерования и растачивания (б, в)

Fig. 2. Formation of the hole cut (а) and its technological inheritance after countersinking and boring (б, в)

Приведенная модель описывает процесс формообразования инструментами, формообразующие элементы которого имеют незначительный осевой сдвиг.

Подобная же система математических моделей была разработана для процессов формообразования отверстий инструментами одностороннего резания, к которым относятся ружейные сверла и зенкеры [2, 3]. Данные модели показывают, что большое значение имеет относительное расположение вершины режущего лезвия и опорного кулачка инструмента, а также углы расположения направляющего и опорного кулачков.

Анализ чертежа пушечного сверла показал, что диаметральный кулачек выдвинут по отношению к вершине режущего лезвия вперед на величину $t = 0,5$ мм (рис. 3). Измерения расстояния t это подтвердили. Такое расположение кулачка приводит к базированию инструмента в процессе обработки по поверхности резания [11].

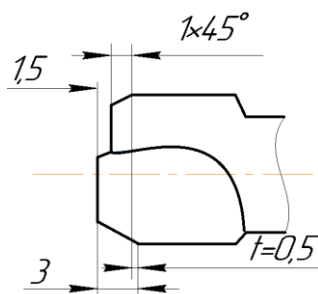


Рис. 3. Схема обработки пушечным сверлом с опережающим осевым расположением кулачка

Fig. 3. Processing with a cannon drill with an advanced axial cam arrangement

Модель, описывающая процесс обработки 2-элементным инструментом при его базировании по поверхности резания, имеет вид

$$p(\varphi) = D - p(\psi - \pi) + \left(\frac{S}{2} - \tau \right), \quad (4)$$

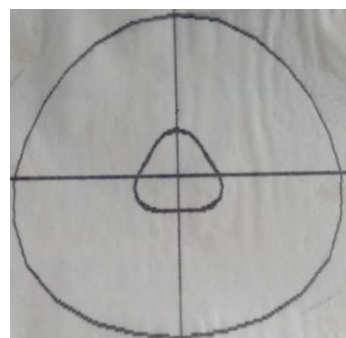
где $p(\varphi)$ – радиус-вектор вершины режущего лезвия в точке касания, мм; D – диаметр инструмента, мм.

Анализ моделей (1) и (4) показал, что:

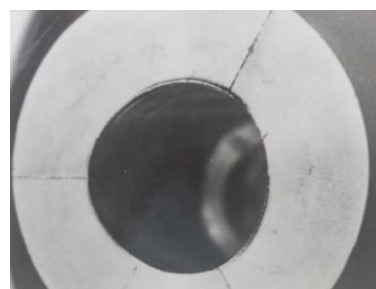
1. Базирование диаметрального кулачка по поверхности резания приводит к образованию «разбивки» отверстия, величина которой может достигать

$$\Delta D(\varphi) = \left(\tau + \frac{S}{2} \right) \cdot \tan \varphi = (0,5 + 0,1) \cdot 1 = 0,6 \text{ мм.}$$

2. Наличие трехгранного отверстия в заготовке приводит к образованию огранки в результате копирования 2-элементным инструментом предварительно полученного отверстия. На рис. 4 приведена траектория движения вершины режущего лезвия ружейного сверла при обработке трехгранного отверстия, подтверждающая копирование погрешности отверстия в заготовке.



а



б

Рис. 4. Копирование погрешности отверстия в заготовке при его обработке ружейным сверлом: а – результат компьютерного моделирования; б – фото обработанной заготовки

Fig. 4. Copying the error of the hole in the workpiece during its processing with a gun drill: а is computer modeling, б is a processed workpiece

Предложены следующие мероприятия, направленные на устранение недостатков существующего технологического процесса [5-8]:

1. Осуществить направление инструмента одностороннего резания существующей конструкции по кондукторной втулке (рис. 5, а) [9].

2. Изменить осевое расположение кулачка по отношению к вершине режущего лезвия, обеспечив базирование выглаживающего кулачка на обработанную поверхность (рис. 5, б).

3. Изменить угловое расположение кулачков, сделав их равными $\psi_1 \approx 105^\circ$, $\psi_2 \approx 215^\circ$ (рис. 5, в и б).

4. Использовать на завершающем переходе зенкер с числом лезвий, равным числу составляющих деталь элементов (для 3-элементной детали применить 3-лезвийный зенкер), что было показано в работах [2, 10].

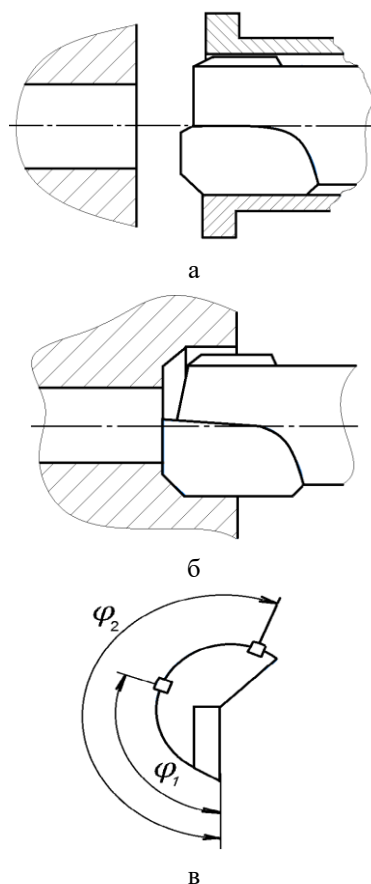


Рис. 5. Методы устранения недостатков технологического процесса: а – по кондукторской втулке; б – на обработанную поверхность; в – расположения кулачков под углами, равными $\psi_1 \approx 105^\circ$, $\psi_2 \approx 215^\circ$

Fig. 5. Methods of eliminating the disadvantages of the technological process: a is along the drill bushing; б is on the treated surface; в is cams arranged at angles $\psi_1 \approx 105^\circ$, $\psi_2 \approx 215^\circ$



Рис. 6. Угловое расположение кулачков при $\psi_1 \approx 105^\circ$, $\psi_2 \approx 215^\circ$

Fig. 6. Cams arranged at angles $\psi_1 \approx 105^\circ$, $\psi_2 \approx 215^\circ$

В частности, базирование опорного и направляющего кулачков на обработанную поверхность обеспечивает стабильность получения диаметра отверстия. Путем анализа результатов расчетов компьютерных моделей процессов сверления и зенкерования определили углы расположения кулачков ружейного сверла и что последующее применение 3-лезвийного зенкера [2] позволяет существенно уменьшить погрешность формы формируемого отверстия (рис. 7, б). На рис. 7 представлено уменьшение некруглости при сверлении отверстия по разработанной технологии.

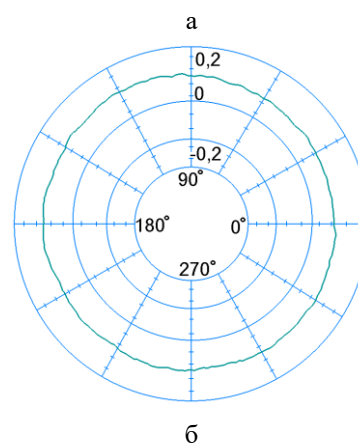
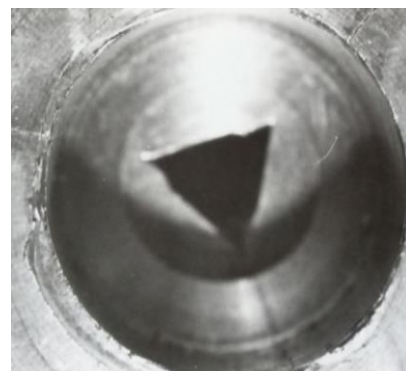


Рис. 7. Уменьшение образования некруглости отверстия: а – фотография полученного отверстия; б – круглограмма отверстия, обработанного инструментом с угловым расположением кулачков $\psi_1 \approx 105^\circ$, $\psi_2 \approx 215^\circ$

Fig. 7. Reduction of out-of-roundness of the hole: a is a resulting hole; б is a roundness chart of the hole processed by a tool with cams arranged at angles $\psi_1 \approx 105^\circ$, $\psi_2 \approx 215^\circ$

Закключение

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что:

1. Для описания закономерностей формообразования отверстий 2-лезвийными инструментами – спиральными сверлами предложена система уравнений радиально-статического типа.

2. Результаты расчетов по разработанной математической модели показали, что необходимо изменить расположение опорных кулачков на корпусе сверла одностороннего резания со значений углов 90 и 180° на 105 и 215° соответственно и применить кондуктор при сверлении.

3. В процессе дальнейшей обработки отверстия необходимо применять зенкер с количеством режущих кромок, равным количеству элементов, составляющих деталь.

Проведенные практические испытания технологии с указанными выше изменениями подтвердили высказанные предположения. Так, сверление отверстий в заготовке по предложенной технологии позволяет существенно уменьшить образование некруглости отверстия. Отклонения формы отверстия были уменьшены с 0,15-0,18 до 0,04-0,05 мм.

Результаты исследований могут быть полезны для развития решений аналогичных задач, предложенных в работах [10, 11], а также в работе [12], направленных на совершенствование процессов обработки.

Список источников

1. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1985. Т. 2. 496 с.
2. Козлов А.В., Дерябин И.П. Исследование процессов формообразования отверстий мерными инструментами: монография. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. 251 с.
3. Ахтаров Д.Р. Исследование точности обработки отверстий в составных деталях // Молодежный научный форум. XII Вузовская научно-исследовательская конференция. Трехгорный, 2020. С. 18-24.
4. Лакирев С.Г., Хилькевич Я.М., Козлов А.В. Математическое моделирование точности обработки глубоких отверстий концевыми мерными инструментами // Прогрессивная технология обработки глубоких отверстий: сб. тез. докл. 7-й Всесоюзной конф. М.: Информатика, 1991. С. 21-24.
5. Развитие теории и технологии проектирования машин, агрегатов и инструмента в процессах обработки давлением и резания / С.И. Платов, Н.Н. Огарков, Д.В. Терентьев, О.С. Железков, В.В. Рубаник, Ж.П. Вассал // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. Т.1. №1. С. 112-115.
6. Дерябин И.П., Токарев А.С. Снижение трудоемкости обработки отверстий на основе повышения точности операций зенкерования сборными инструментами // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №4. С. 107-115.

7. А.с. 1373484 СССР МКИ В 23 В 35/00. Способ многопроходной обработки отверстий / С.Г. Лакирев, Я.М. Хилькевич, А.В. Козлов; № 4092586/31-08; заявл. 15.05.86; опубл. 15.02.88, Бюл. № 6.
8. А.с. 1827331 СССР МКИ В 23 В 35/00. Способ обработки некруглых валов и отверстий и устройство для его осуществления / С.Г. Лакирев, Я.М. Хилькевич, А.В. Козлов, С.Г. Чиненов; № 4922123/08; заявл. 25.03.91; опубл. 15.07.93, Бюл. № 26.
9. А.с. 1579636 СССР МКИ В 23 В 5/44. Способ обработки некруглых валов / С.Г. Лакирев, Я.М. Хилькевич, А.В. Козлов, С.Г. Чиненов; № 4922123/08; заявл. 25.03.91; опубл. 23.07.90, Бюл. № 26.
10. А.с. 2243863 РФ МКИ В 23 В 35. Способ обработки некруглых отверстий в виде эквидистанты «треугольника рело» / Ворона В.В., Лакирев С.Г., Максимов С.П., Чиненов С.Г., Чиненова Т.П.; заявл. 15.05.15; опубл. 23.06.15.
11. Разработка регулируемой расточной оправки для обработки отверстий / А.В. Козлов, С.И. Платов, Е.Ю. Звягина [и др.] // Тяжелое машиностроение. 2021. №10. С. 16-19.
12. Зайдес С.А. Новые способы поверхностного пластического деформирования при изготовлении деталей машин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №3. С. 129-139. DOI: 10.18503/1995-2732-2018-16-3-129-139.

References

1. Kosilova A.G., Meshcheryakova R.K. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitel'ya: v 2 t.* [Machinery's handbook: in 2 volumes]. Moscow: Mechanical Engineering, 1985, vol. 2, 496 p. (In Russ.)
2. Kozlov A.V., Deryabin I.P. *Issledovanie protsessov formoobrazovaniya otverstiy mernymi instrumentami: monografiya* [Research on processes of forming holes with measurement tools: monograph]. Chelyabinsk: Publishing House of South Ural State University, 2006, 251 p. (In Russ.)
3. Akhtarov D.R. Research on accuracy of hole machining in composite parts. *Molodezhny nauchny forum. XII Vuzovskaya nauchno-issledovatel'skaya konferentsiya* [Youth Scientific Forum. The 12th University Research Conference]. Trekhgorny, 2020, pp. 18-24. (In Russ.)
4. Lakirev S.G., Khilkevich Ya.M., Kozlov A.V. Mathematical modeling of accuracy when machining deep holes with end measurement tools. *Progressivnaya tekhnologiya obrabotki glubokikh otverstiy: sb. tez. dokl. 7-y Vsesoyuznoy konf.* [Advanced technology of machining deep holes: collection of abstracts of the 7th All-Union Conference]. Moscow: Informatics, 1991, pp. 21-24. (In Russ.)
5. Platov S.I., Ogarkov N.N., Terentev D.V., Zhelezkov O.S., Rubanik V.V., Vassal J.P. Development of theory and technology of designing machines, units and tools in forming and cutting processes. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2014, vol.1, no. 1, pp. 112-115. (In Russ.)

6. Deryabin I.P., Tokarev A.S. Reducing the labor intensity of hole machining by increasing the accuracy of countersinking operations with precast tools. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2021, vol.19, no. 4, pp. 107-115. (In Russ.)
7. Lakirev S.G., Khilkevich Ya.M., Kozlov A.V. *Sposob mnogoprokhodnoy obrabotki otverstiy* [Method of hole multiple-pass machining]. Author's certificate USSR, no. 1373484, 1988.
8. Lakirev S.G., Khilkevich Ya.M., Kozlov A.V., Chinenov S.G. *Sposob obrabotki nekruglykh valov i otverstiy i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Method of machining out-of-round shafts and holes and the relevant tool]. Author's certificate USSR, no. 1827331, 1993.
9. Lakirev S.G., Khilkevich Ya.M., Kozlov A.V., Chinenov S.G. *Sposob obrabotki nekruglykh valov* [Method of machining out-of-round shafts]. Author's certificate USSR, no. 1579636, 1990.
10. Vorona V.V., Lakirev S.G., Maksimov S.P., Chinenov S.G., Chinenova T.P. *Sposob obrabotki nekruglykh otverstiy v vide ekvidistanty «treugolnika Rele»* [Method of machining out-of-round holes in the form of a cutter center path of a Reuleaux triangle]. Author's certificate USSR, no. 2243863, 2005.
11. Kozlov A.V., Platov S.I., Zvyagina E.Yu. et al. Development of an adjustable boring bar for hole machining. *Tyazheloe mashinostroenie* [Heavy Engineering], 2021, no. 10, pp. 16-19. (In Russ.)
12. Zaides S.A. New methods of surface plastic deformation, when manufacturing machine parts. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2018, vol. 16, no. 3, pp. 129-139. DOI: 10.18503/1995-2732-2018-16-3-129-139.

Поступила 18.10.2022; принята к публикации 31.10.2022; опубликована 22.12.2022
Submitted 18/10/2022; revised 31/10/2022; published 22/12/2022

Козлов Александр Васильевич – доктор технических наук, профессор,
филиал Южно-Уральского государственного университета, Златоуст, Россия.
Email: a_kozlov55@mail.ru.

Дерябин Игорь Петрович – доктор технических наук, профессор,
филиал Южно-Уральского государственного университета, Златоуст, Россия.
Email: deriabinip@susu.ru.

Верещагин Владимир Сергеевич – студент,
филиал Южно-Уральского государственного университета, Златоуст, Россия.
Email: vov.car134@mail.ru. ORCID 0000-0001-5796-9363

Платов Сергей Иосифович – доктор технических наук, профессор,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: mitodim@magtu.ru.

Кургузов Сергей Анатольевич – кандидат технических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: ksaask@mail.ru.

Терентьев Дмитрий Вячеславович – доктор технических наук, профессор,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: d.terentev@magtu.ru.

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

Alexander V. Kozlov – DrSc (Eng.), Professor,
Branch of South Ural State University, Zlatoust, Russia.
E-mail: a_kozlov55@mail.ru

Igor P. Deryabin – DrSc (Eng.), Professor,
Branch of South Ural State University, Zlatoust, Russia.
Email: deriabinip@susu.ru

Vladimir S. Vereshchagin – student,
Branch of South Ural State University, Zlatoust, Russia.
Email: vov.car134@mail.ru. ORCID 0000-0001-5796-9363

Sergey I. Platov – DrSc (Eng.), Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: psipsi@mail.ru.

Sergey A. Kurguzov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: ksaask@mail.ru

Dmitry V. Terentev – DrSc (Eng.), Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: ktnterentyev@mail.ru

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

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И СТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕТАЛЛУРГИИ CONSTRUCTION MATERIALS AND CONSTRUCTION ENGINEERING IN METALLURGY

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 624.078
DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-4-137-143



НОВОЕ КОНСТРУКТИВНОЕ РЕШЕНИЕ ВИБРОЗАЩИТЫ СТЫКОВОГО СОЕДИНЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ПЕРЕКРЫТИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ САМОЗАКЛИНИВАЮЩИХСЯ СТРУКТУР

Кришан А.Л., Песин А.М., Локотунина Н.М., Матвеев С.В., Пивоварова К.Г.

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

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). В настоящее время рост динамических нагрузок, которые передаются фундаментам и иным строительным конструкциям зданий и сооружений, обусловлен интенсивным развитием промышленного производства и увеличением мощностей оборудования. Это вызывает необходимость разработки новых конструктивных решений, позволяющих защитить технологическое оборудование и работающий персонал от неблагоприятных вибрационных воздействий. В условиях динамического воздействия наиболее эффективными конструкциями зданий принято считать конструкции из монолитного железобетона, в частности здания с безбалочным каркасом и поперечной или жесткой арматурой, установленной в плите перекрытия. Недостатком такой конструкции является отсутствие возможности гасить виброколебания при различных динамических воздействиях, что отрицательно сказывается на прочности стыкового соединения, на санитарно-гигиенических условиях пребывания на них людей и на устойчивости работы оборудования. На сегодняшний день в качестве защиты от динамических воздействий приборов и оборудования, устанавливаемых на вибрирующих основаниях, а также оснований и фундаментов разработано множество виброзащитных устройств различных конструктивных разновидностей. Гасители колебаний занимают существенное место среди существующих методов борьбы с вибрациями. Они представляют собой дополнительные динамические устройства, присоединяемые в целях изменения вибрационного состояния объектов виброзащиты. **Новизна.** В настоящей статье предлагается стыковое соединение железобетонного перекрытия с колонной, содержащее плиту перекрытия, колонны верхнего и нижнего яруса, арматурные каркасы колонны, плиты перекрытия и металлические вставки с гасителями колебаний, изготовленными из эластичного материала с прочностью, превышающей прочность бетона колонны (например, битума). **Результат.** Предлагаемая конструкция стыкового соединения позволяет снизить интенсивность виброколебаний безбалочного железобетонного перекрытия и колонны верхнего яруса при динамических воздействиях на колонну нижнего яруса. **Практическая значимость.** Обеспечение увеличения прочности стыкового соединения монолитного железобетонного перекрытия с колонной и существенное повышение долговечности защищаемой конструкции.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, динамические нагрузки, вибрация, стык железобетонного перекрытия с колонной, гасители колебаний, самозаклинивающиеся структуры

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-20073, <https://rscf.ru/project/22-19-20073/> и финансовой поддержки Челябинской области.

© Кришан А.Л., Песин А.М., Локотунина Н.М., Матвеев С.В., Пивоварова К.Г., 2022

Для цитирования

Новое конструктивное решение виброзащиты стыкового соединения железобетонного перекрытия с использованием самозаклинивающихся структур / Кришан А.Л., Песин А.М., Локотунина Н.М., Матвеев С.В., Пивоварова К.Г. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №4. С. 137-143. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-137-143>



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

A NEW CONSTRUCTION SOLUTION FOR VIBRATION PROTECTION OF THE BUTT JOINT OF REINFORCED CONCRETE FLOORS USING INTERLOCKING STRUCTURES

Krishan A.L., Pesin A.M., Lokotunina N.M., Matveev S.V., Pivovarova K.G.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). A current increase in dynamic loads transferred to foundations and other structures of buildings and facilities is attributed to the intensive development of industrial production and higher equipment capacity. This contributes to the development of new design solutions to protect process equipment and operating personnel from adverse vibration effects. Under conditions of dynamic impact, the most efficient building structures are considered to be structures made of monolithic reinforced concrete, in particular, buildings with a beamless frame and transverse or rigid reinforcement installed in the floor slab. The disadvantage of this design is the inability to dampen vibrations under various dynamic impacts, which adversely influence strength of the butt joint, the sanitary and hygienic conditions of people staying on them and stability of equipment. Now, there are many design options of various vibration protection devices to protect against dynamic effects of tools and equipment installed on vibrating bases, and bases and foundations. Vibration dampers are of importance among the existing vibration protection methods. They represent additional dynamic devices attached to change a vibrational state of facilities under vibration protection. **Originality.** This paper proposes a butt joint of a reinforced concrete floor with a column, containing a floor slab, columns of the upper and lower tiers, column reinforcing cages, floor slabs and metal inserts with vibration dampers made of an elastic material with strength exceeding concrete strength of the column (e.g. bitumen). **Result.** The proposed design of the butt joint makes it possible to reduce the intensity of vibration oscillations of a beamless reinforced concrete floor and the column of the upper tier during dynamic loads on the column of the lower tier. **Practical Relevance.** Ensuring an increase in strength of the butt joint of a monolithic reinforced concrete floor with a column and a significant increase in the durability of the protected structure.

Keywords: reinforced concrete structures, dynamic loads, vibration, reinforced concrete floor joint with a column, vibration dampers, interlocking structures

The study was supported by a grant of the Russian Science Foundation and the Chelyabinsk Region (project No. 22-19-20073, <https://rscf.ru/project/22-19-20073/>).

For citation

Krishan A.L., Pesin A.M., Lokotunina N.M., Matveev S.V., Pivovarova K.G. A New Construction Solution for Vibration Protection of the Butt Joint of Reinforced Concrete Floors Using Interlocking Structures. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 4, pp. 137-143. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-137-143>

Введение

Увеличение производственных мощностей промышленных предприятий в условиях интенсификации современного производства неизбежно приводит к увеличению плотности и мощности оборудования, которое функционирует в интенсивном динамическом режиме в цехах промышленных зданий и сооружений, а также в зданиях хозяйственного и административно-бытового назначения. Интенсификация силовых несовершенств каменной кладки, бетона и железобетона, выражающаяся в заметном увеличении амплитуд колебаний и диссипативных потерях энергии за счет формирования гистерезисной петли, возникает как следствие прямого динамического воздействия на конструкции промышленного оборудования. Помимо прямого динамического воздействия, вибрации от оборудования, которые пере-

даются через грунт к конструкциям окружающих зданий, с одной стороны, вызывают их колебания, с другой – приводят к изменению физико-механических свойств грунтов оснований, формируя тем самым дополнительные осадки, например в случаях песчаных грунтов на 20-25% [1, 2]. Как следствие, эксплуатационные качества конструкций резко снижаются, а в крайних, особо опасных случаях – могут привести к их разрушению.

Любая конструкция с точки зрения физической природы динамических процессов – это сложная колебательная система со многими степенями свободы, которая состоит из панелей, балок, стержней, оболочек, на которую, в свою очередь, действуют внешние и внутренние источники колебаний. Потoki вибраций от источников колебаний растекаются по всей конструкции комплекса: отражаются на стыках, неоднородностях, поглощаются и излучаются, создавая тем

самым звуковые шумы, спектр которых расширяется при переходе энергии на нелинейных элементах в область высоких частот. Как следствие многократных переотражений, возникают резонансы и концентрации энергии колебаний на отдельных участках конструкции [3]. Это может привести к разрушению каменной и кирпичной кладки, отслаиванию бетона от арматуры в железобетонных конструкциях, нарушению стыков соединений несущих конструкций и перекрытий.

Кроме того, недопустимо превышение требований санитарных норм, поскольку дополнительные вибрации, возникающие в конструкциях при работе промышленного оборудования, могут оказывать вредное, а иногда и недопустимое влияние на обслуживающий персонал или людей, которые находятся в помещениях, в которых наблюдаются указанные колебания конструкций. Предельные уровни вибрации установлены ГОСТ Р 52892-2007. Различные архитектурно-конструкционные решения предусмотрены для снижения уровня вибрации в конструкциях зданий и сооружений.

Конструкции из монолитного железобетона признаны наиболее эффективными среди прочих конструкций зданий в условиях динамического воздействия. Их специфика позволяет снизить уровни вибрации перекрытий на 5-8 дБ по сравнению со зданиями из сборных железобетонных элементов. Это достигается благодаря тому, что в динамической работе монолитных конструкций возникают более «мягкие» резонансные явления, поскольку эти конструкции представляют собой сплошные разветвленные массивные тела, а не отдельные элементы, как в сборных зданиях.

Наиболее приемлемой схемой здания в этом случае является колонный каркас, поскольку его эффективность повышается с увеличением толщины плит перекрытий и уменьшением сечения колонн. Для сглаживания влияния неоднородностей грунтового основания и распределения и, как следствие, снижения колебаний по площади фундамента, рекомендуется использовать сплошную монолитную железобетонную плиту в качестве фундамента [4].

Здания с безбалочным каркасом занимают большую долю в строительстве из монолитного железобетона. Но такие здания имеют ряд недостатков, наиболее значимым из которых является устройство стыка колонны с перекрытием – с конструктивной точки зрения «слабое место» при работе перекрытия на изгиб и продавливание [5].

В настоящее время предложены различные варианты технических решений устройства стыка

колонны с безбалочным перекрытием [6-10]. Наиболее распространенными являются варианты с установкой поперечной или жесткой арматуры в плите перекрытия, поскольку жесткая арматура увеличивает несущую способность перекрытия на продавливание, но в то же время оказывает незначительное влияние на восприятие изгибающего момента. При этом отсутствует возможность при различных динамических воздействиях гасить виброколебания, что отрицательно сказывается не только на прочности стыкового соединения, но и на устойчивой работе высокоточного технологического оборудования, а также на санитарно-гигиенических условиях пребывания на них людей.

Таким образом, целью работы является создание более прочного стыкового соединения монолитного железобетонного перекрытия с колонной, позволяющего защитить высокоточные технологические процессы и промышленное оборудование от вибрационного воздействия естественного и техногенного происхождения путем их оснащения гасителями колебаний.

Полученные результаты

Гасители колебаний представляют собой дополнительные динамические устройства, присоединяемые к объекту виброзащиты, подверженному динамическим воздействиям от технологического оборудования и ветра, с целью изменения его вибрационного состояния. Существует множество конструктивных решений динамических виброгасителей для зданий и сооружений различной геометрической формы [11-16], которые соответствуют известным геометрическим фигурам, например, квадрату, прямоугольнику, кругу, кубу и прочим правильным фигурам. Однако в последние годы отечественные и зарубежные архитекторы и строители оценили возможности применения самозаклинивающихся структур [17-19], представляющих собой слои из кубов, тетраэдров и октаэдров и других объемных тел. Их особенность состоит в том, что они являются выпуклыми полиэдрами и контакт между ними осуществляется на плоских гранях. Самозаклиниванием они обязаны своей форме и взаиморасположению.

В настоящей работе представлено новое конструктивное решение стыкового соединения железобетонного перекрытия с металлическими вставками и гасителями колебаний в виде самозаклинивающихся структур. Данное соединение представлено на **рис. 1**.

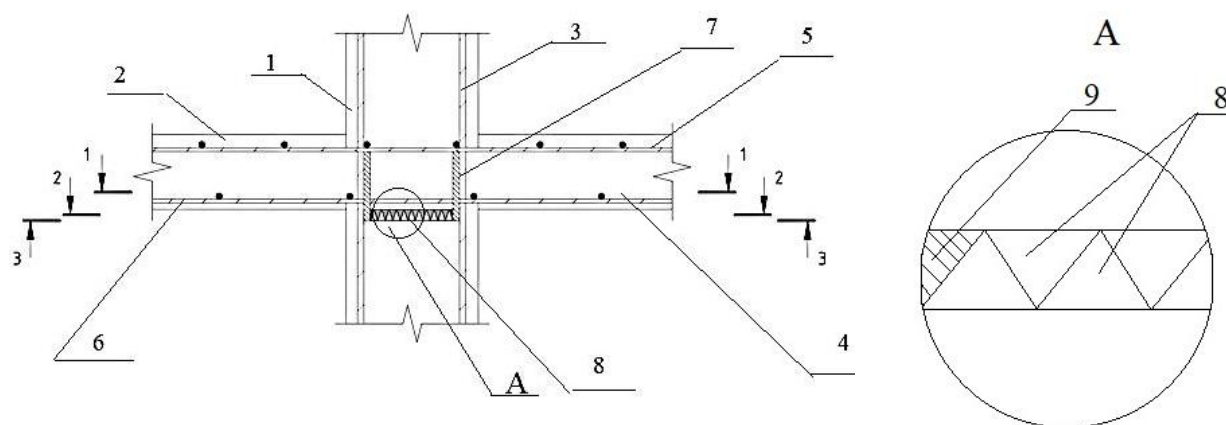


Рис. 1. Соединение колонны с плитой перекрытия в разрезе: 1 – колонна; 2 – плита перекрытия; 3 – арматурный каркас колонны; 4 – арматурный каркас плиты перекрытия; 5 – верхняя сетка; 6 – нижняя сетка; 7 – металлические вставки; 8 – гасители колебаний; 9 – эластичный материал; А – гасители колебаний в разрезе
 Fig. 1. Connection of a column with a floor slab in section: 1 is a column; 2 is a floor slab; 3 is a reinforcing cage of the column; 4 is a reinforcing cage of the floor slab; 5 is upper mesh; 6 is lower mesh; 7 is steel inserts; 8 is vibration dampers; 9 is an elastic material; A is vibration dampers in section

Стыковое соединение безбалочного железобетонного перекрытия с колонной (см. **рис.1**) представляется их себя колонну и плиту перекрытия, внутри которых размещены арматурные каркасы колонны и плиты перекрытия. Арматурный каркас плиты перекрытия включает в себя верхнюю и нижнюю сетки. На арматурных каркасах колонны и верхней сетке плиты перекрытия симметрично относительно осей колонны жестко закреплены металлические вставки в направлении от колонны к плите перекрытия. Каждая металлическая вставка выполнена в виде прямолинейной цельной пластины и установлена таким образом, что проходит сквозь колонну и соединена с арматурными каркасами колонны и плиты перекрытия посредством неразъемного соединения, например только сварным швом. Каждая пара взаимно перпендикулярных цельных металлических вставок соединена между собой посредством встречного паза и сварного соединения.

Участки металлических вставок, расположенные между продольной арматурой каркаса колонны нижнего яруса, имеют увеличенную высоту на величину 0,1-0,5 от толщины перекрытия. Пространство между металлическими вставками от уровня низа плиты перекрытия на эту высоту заполнено гасителями колебаний, выполненными из двух слоев одинаковых элементов, имеющих форму правильных пирамид с квадратными основаниями. Основания каждого слоя пирамид расположены горизонтально и плотно соприкасаются боковыми гранями с соседними элементами слоя, а вершины элементов пирамид каждого слоя касаются горизонтальной поверхности, образуемой основаниями другого слоя. Пустое пространство между металличе-

скими вставками и боковыми поверхностями правильных пирамид заполнено эластичным материалом (например, битумом). Все элементы гасителей колебаний изготовлены из материала с прочностью $R > 1,5 \cdot R_b$, где R_b – прочность бетонной трубчатой колонны.

Установку гасителей колебаний в пространстве между металлическими вставками и заполнение пустого пространства между металлическими вставками и боковыми поверхностями правильных пирамид осуществляют на стройплощадке после бетонирования колонны нижнего яруса до уровня оснований нижнего слоя пирамид гасителей колебаний. Соединение продольных стержней арматурного каркаса колонны и арматурных стержней верхней сетки арматурного каркаса с металлическими вставками осуществляют посредством сварных швов.

После установки металлических вставок и гасителей колебаний (**рис. 2**) в проектное положение производят бетонирование плиты перекрытия и колонны верхнего яруса. Укладка бетона на основания верхнего слоя пирамид гасителей колебаний в пространстве между металлическими вставками не отличается от бетонирования плиты перекрытия и уплотнения бетона в ней.

Предлагаемая конструкция стыкового соединения с металлическими вставками с гасителями колебаний безбалочного монолитного железобетонного перекрытия с колонной обладает высокой надежностью соединения колонны с плитой перекрытия по сравнению со стыковым соединением с металлическими вставками без гасителей колебаний, что позволит существенно повысить долговечность защищаемой конструкции.

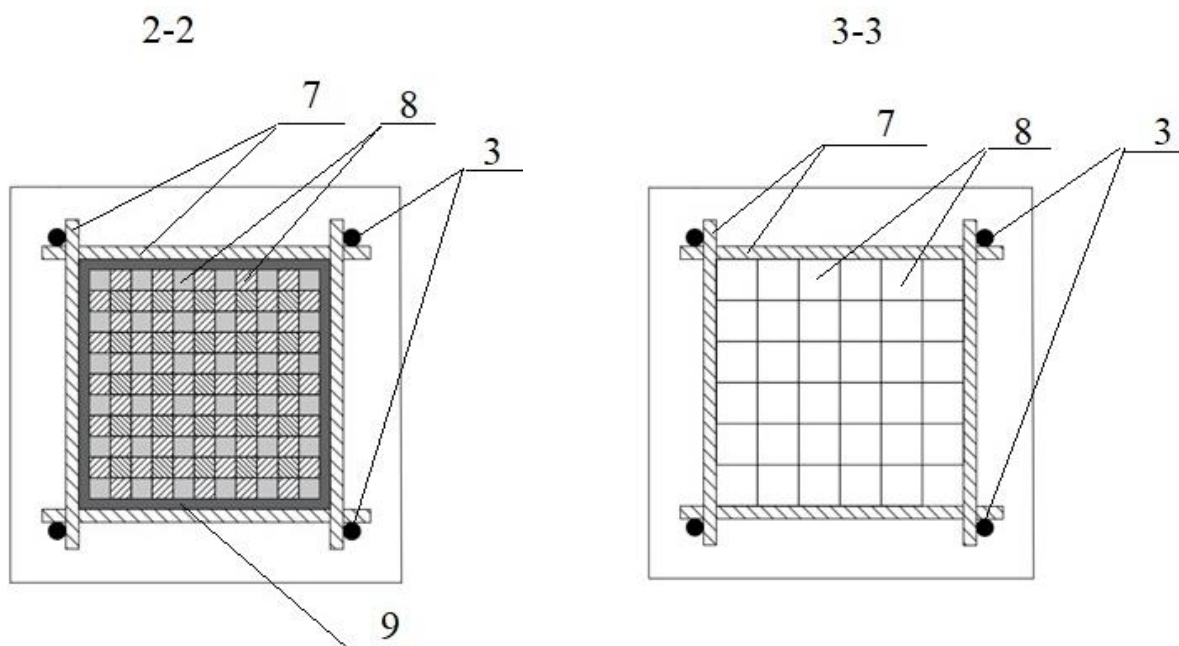


Рис. 2. Гасители колебаний: 2-2 – вид поперечного сечения срединного слоя гасителей; 3-3 – вид снизу на нижний слой гасителей (обозначения те же, что и на рис. 1)

Fig. 2. Vibration dampers: 2-2 is a cross-sectional view of the middle layer of dampers; 3-3 is a bottom view of the lower layer of dampers (the legend is the same as in Fig. 1)

Закключение

Конструкция предлагаемого стыкового соединения с металлическими вставками с гасителями колебаний позволяет снизить интенсивность виброколебаний безбалочного железобетонного перекрытия и колонны верхнего яруса при динамических воздействиях на колонну нижнего яруса. Это обеспечивает увеличение прочности стыкового соединения монолитного железобетонного перекрытия с колонной, устойчивость работы высокоточного технологического оборудования и улучшит санитарно-гигиенические условия пребывания людей на перекрытиях.

Список источников

1. Берлинов М.В. Основы комплексной оценки динамической работы строительных конструкций при вибрационных воздействиях промышленного оборудования: автореф. ... дис. д-ра техн. наук. М., 2005. 43 с.
2. Седых А.А. Защита зданий от вибрации // Омский научный вестник. 2009. № 1 (84). С. 11-14.
3. Гордеев Б.А., Ерофеев В.И., Плехов А.С. Математические модели адаптивных виброизоляторов мобильных и стационарных объектов: монография. Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2017. 124 с.
4. Виброзащита зданий, расположенных вблизи линий метрополитена / А.В. Волков, Н.К. Калашникова, С.А. Курнавин и др. // Строительные материалы. 2005. № 9. С. 50-52.
5. Яров В.А., Коянкин А.А. Стык колонны с перекрытием в безбалочных каркасах многоэтажных зданий // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2007. № 4. С. 75-80.
6. Самохвалова Е.О., Иванов А.Д. Стык колонны с безбалочным бескапитальным перекрытием в монолитном здании // Инженерно-строительный журнал. 2009. №3. С. 33-37.
7. Пат. 2194825 Российская Федерация, МПК E04B 5/43. Стыковое соединение безбалочного монолитного железобетонного перекрытия с колонной / В.В. Власов, В.Г. Мурашкин, А.В. Травин; заявитель и патентообладатель Самарская государственная архитектурно-строительная академия (СамГАСА). № 2003112898/03; заявл. 30.04.2003; опубл. 10.01.2005.
8. Пат. 52035 Российская Федерация, МПК E04B 5/43. Стыковое соединение железобетонного перекрытия с колонной / С.М. Анпилов, А.С. Рыжков; заявитель и патентообладатель С.М. Анпилов. № 2005131818/22; заявл. 13.10.2005; опубл. 10.03.2006.
9. Соколов Б.С., Латыпов Р.Р. Экспериментальные исследования штепсельного стыка колонн на сдвиг при действии статических и сейсмических нагрузок // Бетон и железобетон. 2009. №5. С. 2-5.
10. Пекин Д.А. Несущая способность опорных зон монолитных железобетонных безбалочных перекрытий, усиленных скрытыми металлическими капителями: дис. ... канд. техн. наук. М., 2017. 163 с.

11. Современное состояние методов расчета железобетонных конструкций на действие динамических нагрузок / Ж.Т. Наширалиев, М.Б. Кусбекова, Ж.Н. Жусупова и др. // *European research*. 2017. №5 (28). С. 20-24.
12. Смирнов В.А. Виброзащита высокоточного оборудования на основе виброизоляторов квазиулевой жесткости: дис. ... канд. техн. наук. М., 2014. 172 с.
13. Мелкумян М.Г. Исследование эффективности одно- и двухмассового динамического гасителя колебаний на модели каркасного здания при вибрационных испытаниях // *Инженерно-строительный журнал*. 2012. №5 (31). С. 23-29.
14. Манушина А.Е., Уфимцев Е.К., Чemezov Н.А. Колебания вибрационного стола с динамическим гасителем колебаний // *Политехнический молодежный журнал*. 2019. №3. С. 1-11.
15. Хоменко А.П., Елисеев С.В. Динамическое гашение колебаний: концепция обратной связи и структурные методы математического моделирования // *Проблемы механики современных машин*. 2015. Т. 3. С. 228-234.
16. Palazzo B., Petti L., De Iuliis M. A passive robust control strategy: base isolation and tuned mass damping // *Proceedings of the 3rd European conference on structural control*. Vienna, Austria, 2004, pp. 51-210.
17. Пириайнен В.Ю., Эстрин Ю.З. Топологическое самозаклинивание как принцип инженерного дизайна при строительстве морских и прибрежных сооружений // *Записки Горного института*. 2017. Т. 226. С. 480-486.
18. Fallacara G., Calabria C. About Building Stereotomy: Theory and Practice. Handbook of Research on Visual Computing and Emerging Geometrical Design Tools. Milan, IGI Global, 2016, pp. 575-607.
19. Пат. 2063925 Российская Федерация, МПК В66F 3/00, E04G 11/24. Шаговый подъемник для подъема самозаклинивающихся на колонне перекрытий / Е.М. Израилев, В.П. Обухов; патентообладатели Е.М. Израилев, В.П. Обухов. № 92014874/11; заявл. 09.12.1992; опубл. 20.07.1996.
- stationary facilities]. Nizhny Novgorod: Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, 2017, 124 p. (In Russ.)
4. Volkov A.V., Kalashnikova N.K., Kurnavin S.A., Veretina I.A. Vibration protection of buildings located near subway lines. *Stroitelnye materialy* [Construction Materials], 2005, no. 9, pp. 50-52. (In Russ.)
5. Yarov V.A., Koyankin A.A. Joint of a column with a ceiling in beamless frames of multi-storey buildings. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta* [Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering], 2007, no. 4, pp. 75-80. (In Russ.)
6. Samokhvalova E.O., Ivanov A.D. Joint of a column with a beamless headless floor in a monolithic building. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal* [Journal of Civil Engineering], 2009, no. 3, pp. 33-37. (In Russ.)
7. Vlasov V.V., Murashkin V.G., Travin A.V. *Stykovoe soedinenie bezbalochnogo monolitnogo zhelezobetonnogo perekrytiya s kolonnoy* [Butt connection of a beamless monolithic reinforced concrete floor with a column]. Patent RU, no. 2194825, 2005.
8. Anpilov S.M., Ryzhkov A.S. *Stykovoe soedinenie zhelezobetonnogo perekrytiya s kolonnoy* [Butt joint of a reinforced concrete floor with a column]. Patent RU, no. 52035, 2006.
9. Sokolov B.S., Latypov R.R. Experimental studies of the plug-in joint of columns for shear under static and seismic loads. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], 2009, no. 5, pp. 2-5. (In Russ.)
10. Pekin D.A. *Nesushchaya sposobnost opornykh zon monolitnykh zhelezobetonnykh bezbalochnykh perekrytii, usilennykh skrytymi metallicheskiye kapitelyami*. Diss. kand. tekhn. nauk [Bearing capacity of supporting zones of monolithic reinforced concrete beamless slabs reinforced with hidden metal capitals. Ph.D. thesis]. Moscow, 2017. 163 p.
11. Nashiraliyev Zh. T., Kusbekova M.B., Zhusupova Zh.N., Permyakov M.B. Current state of methods for calculating reinforced concrete structures for dynamic loads. *European Research*, 2017, no. 5 (28), pp. 20-24. (In Russ.)
12. Smirnov V.A. *Vibrozhashchita vysokotochnogo oborudovaniya na osnove vibroizolyatorov kvazinulevoy zhestkosti*. Diss. kand. tekhn. nauk [Vibration protection of high-precision equipment based on vibration isolators of quasi-zero stiffness. Ph.D. thesis]. Moscow, 2014. 172 p.
13. Melkumyan M.G. Study on efficiency of a one- and two-mass dynamic vibration damper on a model of a frame building during vibration tests. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal* [Journal of Civil Engineering], 2012, no. 5 (31), pp. 23-29. (In Russ.)
14. Manushina A.E., Ufimtsev E.K., Chemezov N.A. A vibration table with a dynamic vibration damper. *Politekhnikeskii molodezhnyi zhurnal* [Polytechnic Student Journal], 2019, no. 3, pp. 1-11. (In Russ.)

References

1. Berlinov M.V. *Osnovy kompleksnoy otsenki dinamicheskoy raboty stroitel'nykh konstruktov pri vibratsionnykh vozdeystviyakh promyshlennogo oborudovaniya: avtoref. diss. dokt. tekhn. nauk* [Fundamentals of a comprehensive assessment of the dynamic operation of building structures under the vibrational effects of industrial equipment. Extended abstract of the doctoral thesis]. Moscow, 2005. 43 p.
2. Sedykh A.A. Vibration protection for buildings. *Omskii nauchnyi vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2009, no. 1 (84), pp. 11-14. (In Russ.)
3. Gordeev B.A., Erofeev V.I., Plekhov A.S. *Matematicheskiye modeli adaptivnykh vibroizolyatorov mo-bil'nykh i statsionarnykh obektov* [Mathematical models of adaptive vibration isolators for mobile and

15. Khomenko A.P., Eliseev S.V. Dynamic damping of oscillations: the concept of the feedback and structural methods of mathematical modeling. *Problemy mekhaniki sovremennykh mashin* [Problems of Mechanics of Modern Machines], 2015, no. 3, pp. 228-234. (In Russ.)
16. Palazzo B., Petti L., De Iuliis M. A passive robust control strategy: base isolation and tuned mass damping. Proceedings of the 3rd European Conference on Structural Control. Vienna, Austria, 2004, pp. 51-210.
17. Piiraynen V.Yu., Estrin Yu.Z. Topological interlocking as an engineering design principle in the construction of offshore and coastal structures. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of the Mining Institute], 2017, vol. 226, pp. 480-486. (In Russ.)
18. Fallacara G., Calabria C. About building stereotomy: Theory and practice. Handbook of Research on Visual Computing and Emerging Geometrical Design Tools. Milan, IGI Global, 2016, pp. 575-607.
19. Izrailev E.M., Obukhov V.P. *Shagovyi podemnik dlya podema samozaklinivayushchikhsya na kolonne perekrytii* [A step-type hoist for lifting ceilings interlocking on a column]. Patent RU, no. 2063925, 1996.

Поступила 05.12.2022; принята к публикации 06.12.2022; опубликована 22.12.2022
Submitted 05/12/2022; revised 06/12/2022; published 22/12/2022

Кришан Анатолий Леонидович – доктор технических наук, профессор, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: al.krishan@magtu.ru.

Песин Александр Моисеевич – доктор технических наук, профессор, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: pesin@bk.ru.

Локотунина Наталья Михайловна – кандидат технических наук, доцент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: l.lokotunina@magtu.ru.

Матвеев Сергей Владимирович – доктор физико-математических наук, руководитель проекта, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: matveev@csu.ru.

Пивоварова Ксения Григорьевна – доктор технических наук, доцент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: k.pivovarova@magtu.ru.

Anatoly L. Krishan – DrSc (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: al.krishan@magtu.ru.

Alexander M. Pesin – DrSc (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: pesin@bk.ru.

Natalia M. Lokotunina – PhD (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: l.lokotunina@magtu.ru.

Sergey V. Matveev – DrSc (Physics and Mathematics), Project Manager, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: matveev@csu.ru.

Ksenia G. Pivovarova – DrSc (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: k.pivovarova@magtu.ru.

СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ, ПОДГОТОВКА И ОБУЧЕНИЕ СПЕЦИАЛИСТОВ

DEVELOPMENT STRATEGY, SPECIALIST EDUCATION AND PROFESSIONAL TRAINING

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 332.14:911.37
DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-4-144-153



ОЦЕНКА ПОЛИЦЕНТРИЧНОСТИ СИСТЕМ РАССЕЛЕНИЯ: ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ К МЕТОДАМ, КОЛИЧЕСТВУ НАБЛЮДЕНИЙ И УРОВНЮ АГРЕГИРОВАНИЯ ДАННЫХ

Красносельская Д.Х.¹, Тимирьянова В.М.²

¹ Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

² Башкирский государственный университет, Уфа, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Объективно наблюдаемые процессы глобализации и сопутствующие изменения конфигурации пространственно-организованных систем актуализируют разработку новых методов оценки систем расселения. Концепция полицентрического развития занимает центральное место в системе пространственного стратегирования европейских стран. Сторонники концепции считают, что ее успешное внедрение на различных уровнях иерархически организованных систем позволит снизить асимметрию социально-экономического развития регионов, улучшить доступ к транспортной и социальной инфраструктуре человека вне зависимости от места его проживания. В условиях повсеместного использования автоматизированных систем принятия управленческих решений необходима оценка преимуществ и недостатков существующих методик оценки полицентричности. Целью работы является выявление особенностей применения различных оценок полицентричности в зависимости от используемого метода анализа, количества учитываемых объектов наблюдения и уровня агрегации данных. **Используемые методы.** В работе представлен сравнительный анализ семи методов оценки полицентричности. Исследование проводится на большом массиве данных, включая 18944 территориальные единицы в разрезе 82 субъектов РФ на 1 января 2020 г. **Новизна.** Выявлены зависимости оценок полицентричности от количества наблюдений, используемых методов оценки и уровня агрегации. **Результат.** Сравнительный анализ показал несогласованность оценок, выполненных различными методами оценки полицентричности. Выделены регионы, продемонстрировавшие противоречивые оценки полицентричности/моноцентричности и обоснована чувствительность результатов оценки к количеству включаемых наблюдений. Определена высокая зависимость рангового коэффициента корреляции к уровню агрегации данных, используемых в расчете. **Практическая значимость.** Выявленные особенности оценки полицентричности на примере российской системы расселения могут быть использованы при формировании положений политики территориального развития регионов и поселений.

Ключевые слова: полицентричность, системы расселения, методы оценки, уровень агрегации данных

© Красносельская Д.Х., Тимирьянова В.М., 2022

Для цитирования

Красносельская Д.Х., Тимирьянова В.М. Оценка полицентричности систем расселения: чувствительность к методам, количеству наблюдений и уровню агрегирования данных // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №4. С. 144-153. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-144-153>



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

ESTIMATE OF SETTLEMENT SYSTEMS' POLYCENTRICITY: SENSITIVITY TO METHODS, NUMBER OF OBSERVATIONS AND A LEVEL OF DATA AGGREGATION

Krasnoselskaya D.Kh.¹, Timiryanova V.M.²

¹ Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

² Bashkir State University, Ufa, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). Objectively observed globalization processes and accompanying changes in the configuration of spatially organized systems raises the relevance of development of new methods for estimating settlement systems. The concept of polycentric development takes a central stage in the system of spatial strategizing in European countries. Proponents of the concept believe that its successful implementation at various levels of hierarchically organized systems will reduce the asymmetry of social and economic development of regions and improve access of people to transport and social infrastructure regardless of their places of residence. In the context of the widespread use of automated management decision-making systems, it is necessary to assess advantages and disadvantages of the existing polycentricity estimation methods. **Objectives.** The aim of the study is to identify the features of applying various polycentricity estimates, depending on the analysis method used, the number of relevant objects under observation and the level of data aggregation. **Methods Applied.** The paper presents a comparative analysis of 7 methods for estimating polycentricity. The study is conducted on a large array of data, including 18,944 territorial units in the context of 82 constituent territories of the Russian Federation as of January 1, 2020. **Originality.** We revealed the dependences of polycentricity estimates on the number of observations, the applied methods and the level of aggregation. **Result.** The comparative analysis showed inconsistency in the polycentricity estimates made by different methods. The regions that demonstrated contradictory estimates of polycentricity/monocentricity are identified and the sensitivity of the results to the number of observations included is justified. The high dependence of the rank correlation coefficient on the level of aggregation of the data used in the calculation is determined. **Practical Relevance.** The revealed features of the polycentricity estimates of the Russian settlement system as an example can be used when preparing provisions of a policy on territorial development of regions and settlements.

Keywords: polycentricity, settlement systems, estimation methods, level of data aggregation

For citation

Krasnoselskaya D.Kh., Timiryanova V.M. Estimate of Settlement Systems' Polycentricity: Sensitivity to Methods, Number of Observations and a Level of Data Aggregation. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 4, pp. 144-153. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-144-153>

Введение

Концепция полицентричного развития экономики территорий получила широкое распространение в академических кругах в последние годы. Традиционно полицентричность рассматривается как наиболее эффективная форма пространственной структуры «в привязке» к проблемам оптимального распределения ресурсов, устойчивого развития территорий и снижения уровня социально-экономического неравенства регионов по сравнению с моноцентричной системой [1-5]. Однако, как отмечают ученые, получившее популярность направление региональных исследований аккумулировало в себе большое количество инструментов и методов, дающих противоречивые оценки, а нечеткие аналитические рамки, возникшие в результате эмпирической апробации, приводят к противоречивым выводам о влиянии полицентрической системы на социально-

экономические характеристики территориального развития и порождают неоднозначность в принятии управленческих решений [6]. В связи с этим появились работы, в которых осуществляется сравнение результатов оценки полицентричности, полученных различными методами [5-7] в зависимости от количества включаемых в анализ наблюдений [8, 9]. Установлено, что различия в оценках могут быть значительными, что имеет серьезные последствия при их использовании в последующем анализе причинно-следственных связей. Учитывая вышеизложенное, необходимо дальнейшее изучение условий и причин проявления таких различий в оценках пространственной структуры.

На текущий момент проведенные исследования предполагали апробацию методов оценки полицентричности на достаточно специфичных данных небольших стран Евросоюза и густонаселенного Китая. Кроме того, большинство ра-

бот предполагало анализ не более 50-ти наблюдений в рамках каждого региона. Поэтому исследование, нацеленное на оценку полицентричности/моnocентричности и сравнительный анализ полученных результатов на примере российской пространственной структуры, характеризующейся высоким разнообразием вариантов расселения в разрезе регионов, представляется своевременным и актуальным.

Целью работы является выявление условий появления различных оценок полицентричности в зависимости от используемого метода анализа, количества учитываемых объектов наблюдения и уровня агрегации данных.

В отличие от ранее проводимых исследований, в данной работе расширяется база сравнения за счет территорий с большим количеством объектов наблюдений. Более того, дополнительно изучается влияние на получаемые результаты учитываемого уровня административно-территориального деления (масштаба агрегации данных). В результате конкретизации условий применимости методов, их недостатков и возможностей взаимодополнения, исследование вносит вклад в развитие существующих методов оценки полицентричности/моnocентричности и алгоритмов типологизации территорий.

Методические основы оценки полицентричности

Полицентричность, как антоним моnocентричности, применительно к системам расселения рассматривается с позиции поляризации экономического пространства [1]. Данное понятие образовано от греческих слов *polús* («много») и *kentrikós* («центр») и фактически определяет ситуацию, при которой в рамках конкретной территории формируется более одного центра.

Традиционно оценка полицентричности предусматривает анализ структуры расселения или занятости. Впервые распределение городов и их иерархия были исследованы Ципфом [10]. Он один из первых отметил, что система расселения тяготеет к определенному распределению и применил уравнение, описывающее связь между рангом населенного пункта и численностью населения:

$$\log(Pop_i) = \alpha + \beta \cdot \log(Rank_i), \quad (1)$$

где $Rank_i$ – ранг i -го объекта наблюдения (населенного пункта), полученный путем ранжирования объектов по численности населения; Pop_i – численность населения i -го объекта наблюдения

(населенного пункта); α – константа; β – коэффициент регрессионного уравнения, характеризующий угол наклона или степень полицентричности территории.

В рамках уравнения рангу 1 соответствует самый крупный объект наблюдения, с самой высокой численностью населения. Коэффициент β всегда принимает отрицательное значение, так как с ростом ранга объекта наблюдения его размер, характеризуемый численностью населения, снижается. Чем ниже значение коэффициента, тем сильнее объекты наблюдения отличаются друг от друга, чем ближе значение к нулю, тем более равномерны объекты распределены по численности населения.

Данный показатель активно применяется для оценки систем расселения Российской Федерации [2, 11, 12]. Подход, основанный на ранговом распределении, получил значительное развитие и за рубежом [4, 6, 8, 13, 14]. Интерес к подходу позволил внести ряд улучшений в первоначальный алгоритм.

В частности, Х. Гайбах и Р. Ибрагимов заметили, что получаемые в ходе расчетов оценки сильно смещены в малых выборках [15]. В связи с чем они предложили вычитать $\frac{1}{2}$ из значения ранга при расчетах:

$$\log_{10}(Pop_i) = \alpha + \beta \cdot \log_{10}(Rank_i - 1/2). \quad (2)$$

Другие ученые отметили, что расчеты можно проводить не для всех наблюдений, а только для самых крупных. В исследованиях чаще всего применяются оценки, основанные на первых 4-х и 10-ти наблюдениях [6, 13, 16].

Отмечая преимущества рангового подхода, ученые предлагали усложненные методики оценки полицентричности, в которых оценка коэффициентов выступала только как основа для последующего анализа [5, 17]. В рамках данного метода анализ проводится по данным первых четырех самых крупных населенных пунктов:

$$InterPoly = \frac{1}{3} \sum_{k=2}^4 \left| \frac{1}{InterSlope_k} \right|; \quad (3)$$

$$InterSlope_k = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k (x_i - \bar{x})(y_j - \bar{y})}{\sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})^2}; \quad (4)$$

$$x_i = \log_{10}(\text{Rank}_i + 0,5); \quad (5)$$

$$y_i = \log_{10}(\text{Pop}_i); \quad (6)$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^k x_i}{k}; \quad (7)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^k y_i}{k}, \quad (8)$$

где k принимает значения 2, 3 и 4.

Более низкое значение *InterSlope* предполагает более сбалансированное распределение среди учитываемых в каждом наборе в расчете центров и, таким образом, указывает на более полицентрическую систему. Соответственно, более низкие значения обобщающего показателя *InterPoly* указывают на более высокие уровни моноцентричности.

Помимо метода рангового распределения, учеными предлагались и другие варианты оценки полицентричности. Наиболее простой из используемых методов [6, 14], предполагает оценку доли самого большого населенного пункта в регионе, исходя из предположения о том, что «чем выше его первенство, тем более моноцентричен регион».

Опираясь на логику моноцентричного варианта расселения, в научной литературе для оценки систем расселения предлагается использование индекса Херфиндаля-Хиршмана [17, 18]. В данном случае высокая концентрация населения в пределах одного города указывает на более моноцентричное распределение населения по территории.

Несколько иной подход прослеживается в предложенной М. Вангом [17] методике, представляющей собой адаптацию метода Н. Грина [19], опирающейся на оценки стандартных отклонений:

$$P_G = 1 - \frac{\sigma_F}{\sigma_{F \max}}, \quad (9)$$

где σ_F – стандартное отклонение численности населения объектов наблюдения; $\sigma_{F \max}$ – стандартное отклонение условного набора из двух наблюдений, где численность населения в первом равна нулю, а во втором принимает значение численности населения самого крупного объекта наблюдения (населенного пункта). О полицентричности свидетельствует значение, близкое к 1.

Появление новых методов оценки полицентричности не случайно. На текущий момент не найдено метода, в полной мере отвечающего потребностям исследования систем расселения. Результаты оценки данными методами порой весьма противоречивы [6, 7]. Очевидно, что оценки полицентричности зависят не только от подхода, но и от количества учитываемых наблюдений [6, 8, 9]. Так, при малом количестве наблюдений может диагностироваться полицентричность, однако по мере роста количества наблюдений может начать проявляться моноцентричность [8]. В. Чжанг, Б. Деррудер ставят вопрос о чувствительности мер полицентричности к добавлению новых центров и выделяют три варианта изменения кривой, характеризующей полицентричность [9]. Еще один важный аспект, на который следует обратить внимание, – это уровень агрегации данных. Объективно на результаты оценки может оказывать влияние то, какая единица наблюдения используется в анализе: переписной участок, село/город или городское и сельское поселение, включающее несколько сел/городов с учетом их агломерационной связи. Так, Павлов В.Ю. сделал расчеты, опираясь на данные в разрезе 37-ми муниципальных образований Самарской области [2]. Это достаточно крупное деление для Самарской области, в состав которой входит 25 городских и 1309 населенных пунктов в разрезе 306 городских и сельских поселений. Растворцева С.Н. и Манаева И.В. посчитали целесообразным «включить в анализ некоторые сельские поселения, численность жителей которых увеличивается быстрыми темпами (часто из-за близости к крупным агломерациям), иногда превышая показатели поселков городского типа», так как «такие населенные пункты могут длительное время не относиться к городам по административным причинам, но вносят свой вклад в систему расселения региона» [12]. В свою очередь, Макарова М.Н. опиралась на данные о численности населения 73 городов и поселков городского типа Свердловской области, исключая из анализа сельские поселения [11].

С целью более глубокого изучения чувствительности получаемых оценок полицентричности к методам, количеству объектов наблюдения и уровню агрегации данных были проведены расчеты полицентричности описанными выше методами, проведено сравнение результатов оценки для различного количества включенных наблюдений и для различного уровня агрегации данных.

Данные и этапы анализа

Анализ проводился по данным о численности населения 18944 территориальных единиц (включая города федерального значения, городские округа, городские и сельские поселения, межселенные территории) в разрезе 82 субъектов РФ на 1 января 2020 г., представленным в статистическом бюллетене «Численность населения Российской Федерации по муниципальным образованиям», сформированном Федеральной службой государственной статистики (<https://rosstat.gov.ru/folder/11110/document/13282>). Для целей сравнительного анализа данных на разных уровнях агрегации использовались база о численности населения отдельных населенных пунктов Омской области и Ханты-Мансийского автономного округа, размещенная в ИНИД (Инфраструктура научно-исследовательских данных, АНО «ЦПУР», <http://www.data-in.ru/data-catalog/datasets/160/>).

Анализ проводился в три этапа. На первом этапе осуществлялась оценка полицентричности семью методами, предусматривающими расчет Индекса Херфиндаля-Хиршмана (*HHI*), рангового коэффициента корреляции для первых 4 наблюдений (*Slope2/3/4*), рангового коэффициента корреляции для первых 10-ти наблюдений (*Slope10*), доли самого большого населенного пункта в регионе (*Primacy*), расчета значения *InterPoly*, а также показателя *PG* по адаптированному методу Грина (*Green*). Полученные оценки сравнивались методом корреляционного анализа. Регионы с ярко выраженными различиями в полученных оценках рассматривались более детально. На втором этапе тестировалось изменение полученных оценок полицентричности для регионов в результате увеличения числа учитываемых в расчетах наблюдений. На третьем этапе сравнивались результаты оценки, полученные при расчете на разных уровнях агрегации данных: 1 – для городских и сельских поселений, 2 – для городов, сел, деревень.

Результаты и их обсуждение

Расчеты, проведенные семью методами, показали, что моноцентризм наблюдается в группе: г. Москва и Московская область, в Камчатском крае, Магаданской, Томской и Ярославской областях, Ненецком автономном округе. Аналогично все семь методов указывают на более высокий уровень полицентризма в Краснодарском крае, Республиках Башкортостан, Дагестан и Крым, Ростовской области. Следует отметить, что в отношении ряда регионов получены достаточно противоречивые оценки уровня их полицентрич-

ности/моноцентричности. Например, Омская, Новосибирская, Калининградская и Кемеровская области, Ханты-Мансийский и Ямало-Ненецкий автономные округа одними показателями определяются как более полицентрично, а другими, как более моноцентрично организованные.

С целью выявления степени согласованности оценок нами был проведен корреляционный анализ рангов, полученных субъектами РФ на основе оценок их полицентричности/моноцентричности. Он показал, что в целом оценки *HHI*, *InterPoly*, *Slope2/3/4* фактически аналогичны доле самого крупного населенного пункта в регионе (*Primacy*), что соотносится с результатами сравнительного анализа, проведенного в работе Б. Деррудера [6]. Однако во всех остальных случаях результаты оценок носят более противоречивый характер. Так, аналогично исследованиям Б. Деррудера [6], Б. Бартошевича и С. Марцинчака [7], П. Венери и Д. Бургаласси [14] нами установлено, что оценки, основанные на стандартных отклонениях (*Green*), дали результаты, отличные от тех, которые получены методами, учитывающими ранговое распределение (*Slope2/3/4*) и концентрацию населения в крупных городах (*Primacy*). Проведенные нами расчеты также показали, что оценки, основанные на стандартных отклонениях, (*Green*) и *InterPoly* не коррелируют. Чтобы глубже взглянуть на ситуацию, мы по аналогии с ранее проводимыми исследованиями [8, 9] исследовали различие получаемых оценок полицентричности при различном наборе данных.

Фактически ключевые различия выявляются при сравнении результатов оценки показателей, рассчитываемых на основе всей выборки, и показателей, опирающихся на данные о самых крупных наблюдениях (*Primacy*, *Slope2/3/4*). Мы выделили восемь регионов, в которых эти оценки наиболее сильно различаются. В табл. 1 представлены ранги, определенные для каждого региона на основе полученных оценок их полицентричности различными методами.

Данные табл. 1 показывают, что Кемеровская область согласно оценкам рангового распределения, основанном на данных первых четырех крупнейших поселений (*Slope2/3/4*), определяется как полицентрично организованная система, в то время как оценки по методу Грина (*Green*) и по методу рангового распределения по данным всех наблюдений (*Slope*) указывают на более моноцентричную организацию пространства. И наоборот, Омская и Рязанская области первой группой методов определяются как полицентричные, в то же время значения *Green* и *Slope* позволяют классифицировать их как более моноцентрично организованные территории.

Таблица 1. Ранги, полученные регионами по результатам оценки моно/полицентричности различными мерами
 Table 1. Ranks of the regions based on the mono-/polycentricity estimates by various methods

Наименование субъекта РФ	Количество наблюдений <i>N</i>	<i>NNI</i>	<i>Primacy</i>	<i>Slope2/3/4</i>	<i>Slope 10</i>	<i>InterPoly</i>	<i>Green</i>	<i>Slope</i>
Ханты-Мансийский автономный округ – Югра	99	11	7	4	5	5	70	81
Республика Ингушетия	41	13	9	5	2	7	75	75
Кемеровская область	79	14	4	2	7	2	73	82
Рязанская область	265	68	71	78	48	78	26	5
Ульяновская область	146	74	74	74	77	74	41	8
Омская область	391	79	79	81	76	81	9	9

Визуализация на примере нескольких субъектов РФ позволяет показать, что оценки *Green* и *Slope* определяются в большей степени распределением многочисленных наблюдений, не относящихся к первым по численности населения. В случае Ямало-Ненецкого автономного округа в окружении двух примерно равных основных городов, позволяющих определять его как полицентричный, расположены различные по размеру поселения, распределение которых больше соответствует моноцентричной организации (рис. 1, а). В то же время в Рязанской области один значительно выделяющийся из общей массы поселений центральный город, позволяющий говорить о моноцентризме, окружен небольшими многочисленными поселениями, распределение которых изменяет угол наклона общей прямой (рис. 1, б).

Таким образом, различие оценок определяется несовпадением типа распределения самых крупных поселений и остальной массы поселений, расположенных в окружении.

Результаты оценки *InterPoly* в целом коррелируют с результатами оценок *Slope2/3/4*, *NNI*,

Primacy. Однако обращает на себя внимание очень высокое значение показателя *InterPoly* для Кемеровской и Вологодской областей, Ямало-Ненецкого автономного округа. Анализ распределения населения в поселениях этих регионов показывает, что в них доля первых двух крупнейших наблюдений практически равны. Так, в Кемеровской области численность населения Кемеровского городского округа составляет 556382 чел. (20,9% от общей численности населения субъекта РФ), а Новокузнецкого городского округа 549403 чел. (20,7%). В Вологодской области в городском округе г. Вологда численность населения составляет 317426 чел. (27,4%), городском округе г. Череповец – 314834 чел. (27,1%). В Ямало-Ненецком автономном округе городской округ г. Новый Уренгой – 118033 чел. (21,7%), городской округ г. Ноябрьск – 106911 чел. (19,6%). Таким образом, данный показатель позволяет выделить регионы с двумя и более примерно равными центрами, то есть конкретизировать, что речь не просто о полицентризме, а о таком его проявлении, при котором центры имеют равные веса (рис. 2).

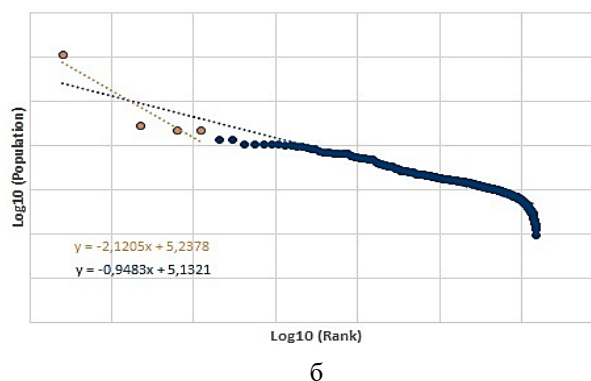
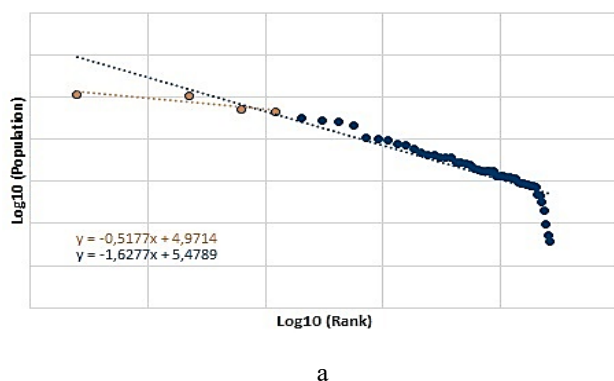


Рис. 1. Ранговое распределение для Ямало-Ненецкого автономного округа (а) и Рязанской области (б), 2020 г.
 Fig. 1. Rank distribution for the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug (a) and the Ryazan Region (б), 2020

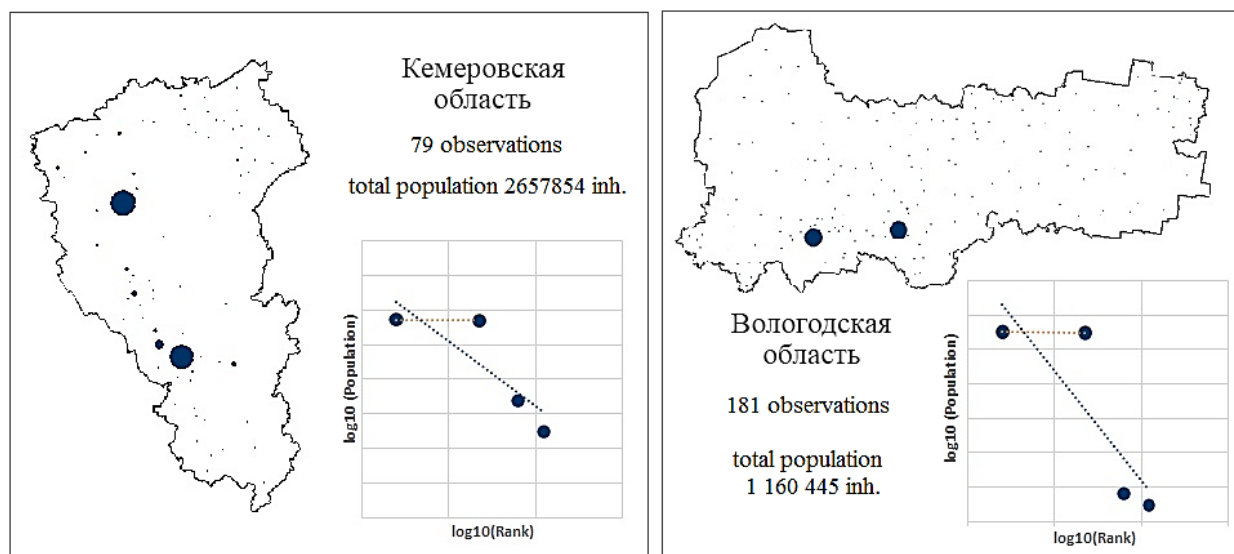


Рис. 2. Ранжированные оценки поли/моноцентричности Кемеровской и Вологодской областей, 2020 г.
Fig. 2. Ranked poly-/monocentricity estimates for the Kemerovo and the Vologda Regions, 2020

Представленные выше графики (см. **рис. 1**) визуально показывают, что расчеты, основанные на данных первых четырех наблюдений и всех наблюдений, будут различаться. Для целей тестирования изменения полученных оценок полицентричности для регионов в результате увеличения числа учитываемых в расчетах наблюдений мы выделили два субъекта РФ (**рис. 3**). Так, Республика Башкортостан, на основе данных первых девяти наблюдений, в целом больше относилась к моноцентрично организованным территориям. По мере увеличения числа наблюдений до 20-ти она оценивалась как более полицентрично организо-

ванная территория. Далее до 166-го наблюдения значение коэффициента β (угол наклона, *Slope*) снижалось и затем снова начало увеличиваться, в итоге не сильно, но превышая значение «-1» после включения 384-го наблюдения. Такое волнообразное изменение фактически объясняется тем, что внутри ранжированного ряда высокая частота встречаемости поселений определенного размера. Обратная, но зеркально похожая ситуация складывается в республике Татарстан. Следовательно, число учитываемых в расчетах объектов наблюдения сказывается на полученный результат оценки полицентричности.

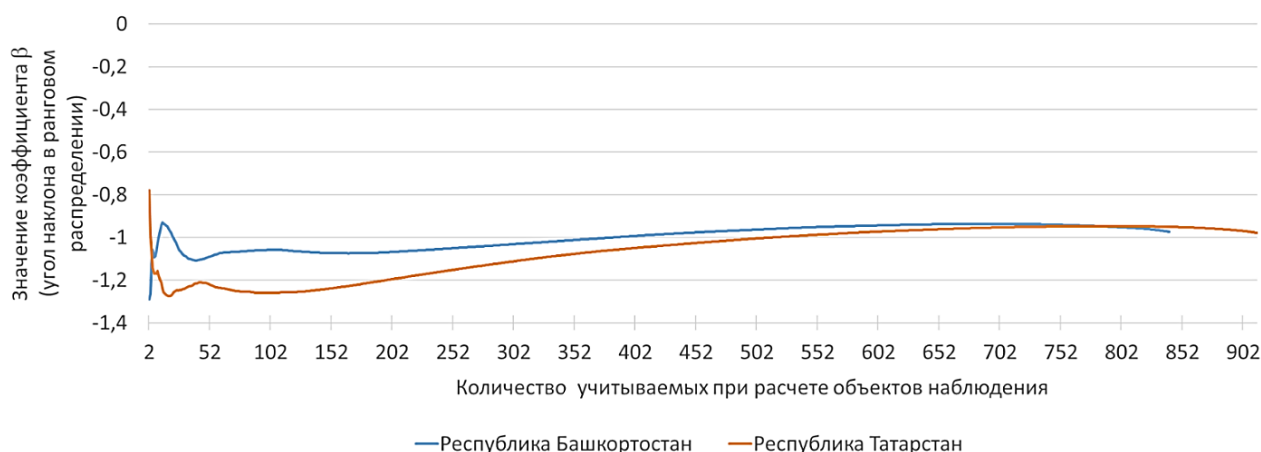


Рис. 3. Значение коэффициента β (угол наклона, *Slope*), оцениваемое по методу рангового распределения для различного числа учитываемых объектов наблюдений
Fig. 3. Coefficient β (slope angle) estimated by the rank distribution method for a different number of relevant objects under observation

Анализ результатов расчета показателей на разном уровне агрегации также показывает, что результат может отличаться. Административно-территориальное деление Российской Федерации выделяет несколько уровней: национальный, региональный, муниципальный. При этом на муниципальном уровне выделяются несколько уровней подчинения: 1 – городские округа и муниципальные районы, 2 – городские и сельские поселения, 3 – городские и сельские населенные пункты. Отличие второго от третьего состоит в том, что под населенным пунктом понимается конкретная деревня, село, город, а под поселением один или несколько объединенных общей территорией населенных пунктов. Представленные данные для Омской области и Ханты-Мансийского автономного округов в целом позволяют говорить, что уровень агрегации данных оказывает влияние только на оценку рангового коэффициента корреляции при включении всех объектов наблюдения (табл. 2).

Таблица 2. Результаты оценки полицентричности на разном уровне агрегации данных
Table 2. Polycentricity estimates at different levels of data aggregation

Число объектов наблюдения	<i>HHI</i>	<i>Primacy</i>	<i>Slope2/3/4</i>	<i>Slope 10</i>	<i>InterPoly</i>	<i>Green</i>	<i>Slope</i>
Омская область							
391 городское и сельское поселение	3604	59,9	-2,12	-1,42	0,12	0,90	-0,95
1430 населенных пунктов	3643	60,3	-2,12	-1,43	0,12	0,95	-1,42
Ханты-Мансийский автономный округ							
99 городских и сельских поселений	978	22,7	-0,69	-0,84	0,72	0,74	-1,66
192 населенных пункта	957	22,3	-0,69	-0,84	0,74	0,81	-2,16

Так как большинство включенных в анализ показателей опираются на данные только первых десяти крупнейших поселений, некоторые различия в полученных оценках для них связаны с тем, что часто городские поселения помимо городских населенных пунктов включают и проживающее рядом сельское население в рамках городских округов. Объективно следует ожидать различия в оценках для таких городских поселений, которые включают несколько городов (например, городской округ г. Махачкалы,

помимо самого города, включает 8 поселков городского типа, удельный вес которых составляет 18% от общей численности округа).

Заключение

Проведенный анализ показал, что оценка полицентричности чувствительна к применяемым методам, количеству включенных в анализ наблюдений и уровню агрегации данных. Это снижает возможности автоматизированного анализа систем расселения, требуя детального изучения каждого случая. Каждый метод в отдельности не дает точной оценки. Только совместное рассмотрение результатов оценки *InterPoly*, *HHI*, *Primacy*, *Green* и *Slope* позволяет увидеть полную картину. Большое количество мелких поселений влияет на «пологость» линии регрессии, изменяя результат оценки, сделанный на основе большего количества объектов наблюдения в сравнении с данными оценки для первых четырех или десяти наблюдений. Уровень агрегации данных также влияет на получаемые оценки, требуя более четкого аргументирования дизайна расчетов целям анализа.

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости дальнейших исследований, направленных на разработку более совершенных методов анализа полицентричности. В частности, это могут быть методы, одновременно учитывающие результаты оценки систем расселения несколькими вариантами, которые дополняют друг друга.

Список источников

1. Гетманцев К.В. Полицентричность экономического пространства региона и методы её измерения // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2020. № 8. С. 61-68.
2. Павлов Ю.В. Баланс системы расселения региона: оценка по закону Ципфа и влияние на региональное развитие // Вопросы территориального развития. 2020. Т. 8. № 2. URL: <http://vtr.isertram.ru/article/28521>
3. Krasnoselskaya D., Timiryanova V. Do polycentric patterns influence the economic performance of municipalities? Empirical evidence from Russia // Regional Science Policy & Practice. 2022. Pp. 1-22.
4. Sun B., Li W., Zhang Z., Zhang T., Is polycentricity a promising tool to reduce regional economic disparities? Evidence from China's prefectural regions // Landscape and Urban Planning. 2019. Vol. 192. 103667.
5. Wang M., Derudder B., Liu X. Polycentric urban development and economic productivity in China: A multiscalar analysis // Environment and Planning A: Economy and Space. 2019. Vol. 51(8). Pp. 1622-1643.
6. Derudder B., Liu X., Wang M., Zhang W., Wu K., Caset F. Measuring polycentric urban development: The

- importance of accurately determining the “balance” between “centers” // *Cities*. 2021. Vol. 111. 103009.
7. Bartosiewicz B., Marcinczak S. Investigating polycentric urban regions: different measures – different results // *Cities*. 2020. Vol. 105. 102855.
 8. Möck M., Küpper P. Polycentricity at its boundaries: consistent or ambiguous? // *European Planning Studies*. 2020. Vol. 28. No. 4. Pp. 830-849.
 9. Zhang W., Derudder B. How sensitive are measures of polycentricity to the choice of ‘centres’? A methodological and empirical exploration // *Urban studies*. 2019. Vol. 56. No. 16. Pp. 3339-3357.
 10. Zipf G. K. *Human Behavior and the Principle of Least Effort*. 1949. Addison-Wesley press inc. Massachusetts. 573 p.
 11. Макарова М.Н. Малые города в пространственной структуре размещения населения региона // *Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз*. 2017. Т. 10. № 2. С. 181-194.
 12. Растворцева С.Н., Манаева И.В. Тенденции и факторы современного развития малых и средних городов // *Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз*. 2022. Т. 15. № 1. С. 110-127.
 13. Meijers E. J., Burger M. J., *Spatial Structure and Productivity in US Metropolitan Areas* // *Environment and Planning A: Economy and Space*. 2010. № 42(6). Pp. 1383-1402.
 14. Veneri P., Burgalassi D. Questioning Polycentric Development and its Effects. Issues of Definition and Measurement for the Italian NUTS-2 Regions // *European Planning Studies*. 2012. Vol. 20(6). Pp. 1017-1037.
 15. Gabaix X., Ibragimov R. Rank-1/2: A simple way to improve the OLS estimation of tail exponents // *Journal of Business and Economic Statistics*. 2011. № 29. Pp. 24-39.
 16. Burger M., Meijers E., Form follows function? Linking morphological and functional polycentricity // *Urban Studies*. 2012. Vol. 49(5). Pp. 1127-1149.
 17. Wang M. Polycentric urban development and urban amenities: Evidence from Chinese cities // *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*. 2020. Vol. 48. No. 3. Pp. 400-416.
 18. Volgmann K., Münter A. Understanding metropolitan growth in German polycentric urban regions // *Regional Studies*. 2022. Vol. 56(1). Pp. 99-112.
 19. Green N. Functional Polycentricity: A Formal Definition in Terms of Social Network Analysis // *Urban Studies*. 2007. Vol. 44. No. 11. Pp. 2077-2103.
 - [Territorial Development Issues], 2020, vol. 8, no. 2 (52). (In Russ.)
 3. Krasnoselskaya D., Timiryanova V. Do polycentric patterns influence the economic performance of municipalities? Empirical evidence from Russia. *Regional Science Policy & Practice*, 2022, pp. 1-22.
 4. Sun B., Li W., Zhang Z., Zhang T. Is polycentricity a promising tool to reduce regional economic disparities? Evidence from China’s prefectural regions. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 192, 103667.
 5. Wang M., Derudder B., Liu X. Polycentric urban development and economic productivity in China: A multiscalar analysis. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 2019, 51(8), 1622-1643.
 6. Derudder B., Liu X., Wang M. et al. Measuring polycentric urban development: The importance of accurately determining the “balance” between “centers”. *Cities*, 2021, 111, 103009.
 7. Bartosiewicz B., Marcinczak S. Investigating polycentric urban regions: different measures – different results. *Cities*, 2020, 105, 102855.
 8. Möck M., Küpper P. Polycentricity at its boundaries: consistent or ambiguous? *European Planning Studies*, 2020, 28, 4, 830-849.
 9. Zhang W., Derudder B. How sensitive are measures of polycentricity to the choice of ‘centres’? A methodological and empirical exploration. *Urban studies*, 2019, 56, 16, 3339-3357.
 10. Zipf G.K. *Human behavior and the principle of least effort*. Addison-Wesley Press Inc. Massachusetts, 1949, 573 p.
 11. Makarova M.N. Small towns in the spatial structure of regional population distribution. *Ekonomicheskie i sotsialnye peremeny: fakty, tendentsii, prognoz* [Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast], 2017, no. 1, pp. 181-194. (In Russ.)
 12. Rastvortseva S.N., Manaeva I.V. Modern development of small and medium-sized cities: Trends and drivers. *Ekonomicheskie i sotsialnye peremeny: fakty, tendentsii, prognoz* [Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast], 2022, vol. 15, no. 1, pp. 110-127. (In Russ.)
 13. Meijers E.J., Burger M.J. Spatial structure and productivity in US metropolitan areas. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 2010, 42(6), 1383-1402.
 14. Veneri P., Burgalassi D. Questioning polycentric development and its effects. Issues of definition and measurement for the Italian NUTS-2 regions. *European Planning Studies*, 2012, 20(6), 1017-1037.
 15. Gabaix X., Ibragimov R. Rank-1/2: A simple way to improve the OLS estimation of tail exponents. *Journal of Business and Economic Statistics*, 2011, 29, 24-39.
 16. Burger M., Meijers E. Form follows function? Linking morphological and functional polycentricity. *Urban Studies*, 2012, 49(5), 1127-1149.
 17. Wang M. Polycentric urban development and urban amenities: Evidence from Chinese cities. *Environ-*

References

1. Getmantsev K.V. Polycentricity of the region economic space and methods of its measurement. *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii* [Bulletin of Kursk State Agricultural Academy], 2020, no. 8, pp. 61-68. (In Russ.)
2. Pavlov Yu.V. Regional settlement system balance: Assessment under Zipf’s Law and impact on the regional development. *Voprosy territorialnogo razvitiya*

- ment and Planning B: Urban Analytics and City Science, 2020, 48 (3), 400-416.
18. Volgmann K., Münter A. Understanding metropolitan growth in German polycentric urban regions. Regional Studies, 2022, 56(1), 99-112.
19. Green N. Functional polycentricity: A formal definition in terms of social network analysis. Urban Studies, 2007, 44 (11), 2077-2103.

Поступила 28.09.2022; принята к публикации 09.10.2022; опубликована 22.12.2022
Submitted 28/09/2022; revised 09/10/2022; published 22/12/2022

Красносельская Дина Хадимовна – кандидат экономических наук, доцент,
Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия.
Email: dina-hamzina@mail.ru. ORCID 0000-0002-1668-2937

Тимирьянова Венера Маратовна – доктор экономических наук, доцент,
Башкирский государственный университет, Уфа, Россия.
Email: 79174073127@mail.ru. ORCID 0000-0002-1004-0722

Dina Kh. Krasnoselskaya – PhD (Economics), Associate Professor,
Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia.
Email: dina-hamzina@mail.ru. ORCID 0000-0002-1668-2937

Venera M. Timiryanova – DrSc (Economics), Associate Professor,
Bashkir State University, Ufa, Russia.
Email: 79174073127@mail.ru. ORCID 0000-0002-1004-0722