

ВЕСТНИК

Магнитогорского государственного технического
университета им. Г.И. Носова

2022. Т.20, №1

Журнал включен в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (Перечень ВАК). Сведения о журнале содержатся в международных и российских базах данных: Ulrich's Periodicals Directory, Crossref, Google Scholar, RSCI на платформе Web of Science, 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), В.Е. Громов (Россия),
Я. Грум (Словения), 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
Ответственный секретарь М.В. Шубина
Редактор Н.П. Боярова
Технический редактор И.В. Ключникова
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 25.03.2022. Заказ 75. Тираж 500 экз. Цена свободная.

VESTNIK

of Nosov Magnitogorsk State Technical University

2022. Vol.20, no.1

The Journal is included in the List of Russian Peer-Reviewed Scientific Journals which are supposed to publish the major results of doctoral and PhD dissertations (the list issued by the Higher Attestation Commission). Information about the journal can be found in international and Russian databases: Ulrich's Periodicals Directory, Crossref, Google Scholar, RSCI on the Web of Science platform, VINITI (the All-Russian Institute of Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences), and others. The digital version of the Journal is available at eLIBRARY.RU.

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),
V.E. Gromov (Russia), J. Grum (Slovenia),
V.N. Kalmykov (Russia), D.R. Kaplunov (Russia),
R. Kawalla (Germany), V.R. Khrashin (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. Khrashin, N.N. Orekhova

Executive Secretary M.V. Shubina

Editor N.P. Boyarova

Technical Editor I.V. Klyunnikova

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: 25.03.2022. Order 75. Circulation: 500. Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

Разработка полезных ископаемых	5
<i>Чебан А.Ю.</i>	
Обоснование способа выемки ценного минерального сырья, содержащегося в весьма тонких рудных залежах	5
<i>Богатырев Д.М., Петров Г.В., Цымбулов Л.Б.</i>	
Пирометаллургические технологии переработки сульфидных медно-никелевых руд с высоким содержанием металлов платиновой группы: современное состояние и перспективы развития.....	14
Технологии переработки и утилизации техногенных образований и отходов	25
<i>Ляшенко В.И., Воробьев А.Е., Хоменко О.Е., Дудар Т.В.</i>	
Развитие технологий и технических средств для снижения воздействия на окружающую среду в зоне влияния хвостохранилища	25
Обработка металлов давлением	42
<i>Колчин С.А., Горохов Ю.В., Ковалева А.А., Базан Д.А., Божко Д.Н.</i>	
Технология изготовления дамасской стали ковкой многослойных пакетов	42
Стандартизация, сертификация и управление качеством.....	50
<i>Наркевич М.Ю., Логунова О.С., Корниенко В.Д., Калитаев А.Н., Суровцов М.М., Луганская Д.А., Чернышева А.С.</i>	
Интеллектуальная система принятия решений при оценке качества зданий и сооружений на опасных производственных объектах: определение траектории движения беспилотного летательного аппарата	50
<i>Кунаков Е.П.</i>	
Применение новых подходов к циклу Деминга	61
Новые технологические процессы и оборудование.....	71
<i>Филяков А.Д., Романов Д.А., Будовских Е.А.</i>	
Влияние биоинертных электровзрывных покрытий на распределение напряжений на границе раздела имплант-кость.....	71
<i>Сафаров Д.Т., Чех А.В.</i>	
Идентификация наладочных смещений штампового оборудования для управления геометрической точностью поковок коленчатых валов большегрузных автомобилей	83
<i>Акинцева А.В., Переверзев П.П.</i>	
Моделирование изменения глубины резания в разных сечениях обрабатываемой поверхности в цифровом двойнике операции круглого врезного шлифования с ЧПУ	95

CONTENTS

Mining.....	5
<i>Cheban A.Yu.</i>	
Substantiation of a Method for Processing Valuable Mineral Raw Materials Contained in Very Thin Ore Deposits.....	5
<i>Bogatyrev D.M., Petrov G.V., Tsymbulov L.B.</i>	
Pyrometallurgical Technologies for Processing Sulfide Copper-Nickel Ores with a High Content of Platinum Group Metals: Current State and Prospects of Development.....	14
Recycling of Man-Made Mineral Formations and Waste.....	25
<i>Lyashenko V.I., Vorobiev A.E., Khomenko O.E., Dudar T.V.</i>	
Development of Technologies and Technical Facilities to Reduce the Environmental Impact in the Area of Influence of the Tailings Dam.....	25
Metal Forming	42
<i>Kolchin S.A., Gorokhov Yu.V., Kovaleva A.A., Bazan D.A., Bozhko D.N.</i>	
Damascus Steel Manufacturing Technology by Forging Multi-Layer Packages.....	42
Standardization, Certification and Quality Management.....	50
<i>Narkevich M.Yu., Logunova O.S., Kornienko V.D., Kalitaev A.N., Surovtsov M.M., Luganskaya D.A., Chernysheva A.S.</i>	
An Intelligent Decision Support System for Assessing the Quality of Buildings and Structures at Hazardous Industrial Facilities: Determining the Trajectory of the Unmanned Aircraft	50
<i>Kunakov E.P.</i>	
Applying New Approaches to the Deming Cycle	61
New Technological Processes and Equipment.....	71
<i>Filyakov A.D., Romanov D.A., Budovskikh E.A.</i>	
The Effect of Bioinert Electroexplosive Coatings on Stress Distribution near the Dental Implant-Bone Interface.....	71
<i>Safarov D.T., Chekh A.V.</i>	
Identifying Adjustment Offsets of Metal-Forming Equipment to Control Geometrical Accuracy of Crankshaft Forgings for Heavy Trucks	83
<i>Akintseva A.V., Pereverzev P.P.</i>	
Modeling the Cutting Depth Change in Different Sections of the Processed Surface in the Digital Twin of the Circular Plunge CNC Grinding Operation	95

<i>Некрасов И.И., Паршин В.С., Федулов А.А.</i>	
Выбор рациональных параметров геометрии рычагов радиально-ковочной машины	105
Надежность и долговечность металлургического оборудования	112
<i>Кондрашова Ю.Н., Третьяков А.М., Шалимов А.В.</i>	
Оценка влияния разработки регламентов технического обслуживания и ремонта производственного оборудования с целью минимизации затрат и убытков предприятия черной металлургии	112

<i>Nekrasov I.I., Parshin V.S., Fedulov A.A.</i>	
Choosing Rational Geometry Parameters of Levers for a Radial Forging Machine	105
Reliability and Durability of Metallurgical Equipment	112
<i>Kondrashova Yu.N., Tretiakov A.M., Shalimov A.V.</i>	
Assessment of the Impact of Developing Production Equipment Maintenance and Repair Schedules in Order to Minimize Costs and Losses of the Ferrous Metallurgy Enterprise	112

РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

MINING

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

УДК 622.271

DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-1-5-13



ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА ВЫЕМКИ ЦЕННОГО МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ, СОДЕРЖАЩЕГОСЯ В ВЕСЬМА ТОНКИХ РУДНЫХ ЗАЛЕЖАХ

Чебан А.Ю.

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

Аннотация. Актуальность и цель исследования. В связи со снижением качественных показателей запасов многих полезных ископаемых и усложнением условий их отработки все больший интерес начинают представлять запасы ценного минерального сырья, сосредоточенные в тонких и весьма тонких рудных жилах. Разработка подобных запасов с применением традиционных технологий, включающих взрывное рыхление, приводит к значительному разубоживанию рудной массы пустыми породами, это повышает себестоимость переработки сырья и снижает выход металла. В то же время известные технологии и оборудование для механической селективной выемки не обеспечивают должной эффективности при разработке весьма тонких жил, сложенных прочными горными породами. Перспективным способом извлечения локальных участков штучных руд может стать их оконтуривание посредством нарезания щелей. **Цель работы.** Обоснование ресурсосберегающего способа отработки весьма тонких рудных жил, обеспечивающего повышение производительности локальной механической выемки и снижение энергоемкости данного процесса. **Результаты.** Проведенные экспериментальные исследования по резанию образцов прочных околожильных пород одного из золоторудных месторождений Дальневосточного региона показали удовлетворительные результаты по производительности и энергоемкости. В статье предлагается способ комбинированной отработки весьма тонких рудных жил, содержащих ценное минеральное сырье, с применением усовершенствованного комбайна. Способ заключается в локальной опережающей механической высокоселективной восходящей выемке наиболее богатых участков крутопадающей жилы посредством нарезания щелей отрезными дисками по границам жилы и выламывания образовавшегося целика с помощью эластичного разжимного устройства с последующим взрывным рыхлением околожильных пород. Оставшаяся часть жилы с меньшими содержаниями металла в руде извлекается посредством традиционных технологий, основанных только на взрывном рыхлении прочных горных пород. Раздельная переработка руд различных сортов обеспечивает более высокие показатели извлечения металла, что компенсирует дополнительные затраты, связанные с локальной механической выемкой богатых участков жилы. **Выводы.** Применение предлагаемого способа по селективному извлечению наиболее богатых участков весьма тонких рудных жил с использованием усовершенствованного комбайна позволяет существенно сократить количество нарезаемых щелей, снизить энергоемкость процесса подготовки прочных горных пород к выемке и увеличить производительность оборудования в сравнении с известной комбинированной технологией. Выламывание оконтуренных щелями целиков посредством эластичного домкрата повышает надежность и качество механической выемки, а также обеспечивает снижение нагрузок на металлоконструкцию комбайна.

Ключевые слова: весьма тонкие рудные жилы, селективная механическая выемка, отрезные диски, нарезание щелей, эластичный домкрат, выламывание целиков, производительность, энергоемкость.

© Чебан А.Ю., 2022

Для цитирования

Чебан А.Ю. Обоснование способа выемки ценного минерального сырья, содержащегося в весьма тонких рудных залежах // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №1. С. 5–13. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-1-5-13>



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

SUBSTANTIATION OF A METHOD FOR PROCESSING VALUABLE MINERAL RAW MATERIALS CONTAINED IN VERY THIN ORE DEPOSITS

Cheban A.Yu.

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

Abstract. Relevance and purpose of the study. Due to a decline in the quality indicators of much mineral reserves and complicating conditions for their development, reserves of valuable mineral raw materials, concentrated in thin and very thin ore veins, are of growing interest. The development of such reserves using conventional technologies, including explosive ripping, leads to a significant dilution of the ore mass with empty rocks; this increases the cost of processing raw materials and reduces the throughput of metal. At the same time, well-known technologies and equipment for mechanical selective excavation do not provide adequate efficiency in the development of very thin ore veins composed of strong rocks. A promising method for extracting local areas of lump ores may be their delineation by cutting slots. **Objective.** Substantiation of a resource-saving method for mining very thin ore veins, providing an increase in performance of local mechanical extraction and a decrease in energy intensity of this process. **Results.** Experimental studies on cutting samples of vein rocks from one of the gold deposits of the Far East region showed satisfactory results in terms of performance and energy intensity of this process. The paper proposes a method of combined mining of very thin ore veins containing valuable mineral raw materials with an improved mining machine. The method consists in a local advanced mechanical highly selective ascending excavation of the richest sections of a steeply dipping ore vein by cutting slots with cutting discs along the vein boundaries and breaking out the formed pillar using an elastic expanding device, followed by explosive ripping of adjacent rocks. The rest of the vein with lower metal content in ore is recovered using conventional technologies based only on explosive loosening of solid rocks. Separate processing of various grades of ores provides higher rates of metal recovery, which compensates for the additional costs associated with local mechanical extraction of rich vein areas. **Conclusions.** The use of the proposed method for the selective extraction of the richest areas of very thin ore veins using the improved mining machine can significantly reduce the number of slots cut, reduce energy intensity of the process of preparing solid rocks for excavation and increase performance of equipment in comparison with the known combined technology. Breaking out the pillars contoured with slots by means of an inflatable jack increases reliability and quality of mechanical excavation, as well as reduces the load on the steel structure of the mining machine.

Keywords: very thin ore veins, selective mechanical mining, cutting discs, slotting, inflatable jack, pillars breaking, performance, energy intensity.

For citation

Cheban A.Yu. Substantiation of a Method for Processing Valuable Mineral Raw Materials Contained in Very Thin Ore Deposits. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 1, pp. 5–13. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-1-5-13>

Введение

Недра России содержат значительный ресурсный потенциал стратегических видов минерального сырья, в том числе благородных и редких металлов, необходимых для развития высокотехнологичных отраслей производства. Разработка месторождений данного сырья должна осуществляться с применением малоотходных, энергоэффективных и ресурсосберегающих технологий [1, 2]. В настоящее время в связи со снижением качественных показателей запасов многих полезных ископаемых и усложнением

условий их отработки все больший интерес начинают представлять запасы ценного минерального сырья, сосредоточенные в тонких и весьма тонких рудных жилах мощностью первые десятки сантиметров [3–5]. Так, содержание золота в жильной массе может составлять десятки и сотни грамм на тонну, однако по причине того, что минимальная ширина очистного пространства при ведении подземных работ составляет 0,9–1,1 м, неизбежно существенное разубоживание богатых руд околосильными породами, кроме того, взрывное рыхление ведет к переизмельчению части рудной массы. Разубоживание

и переизмельчение руд при добыче в дальнейшем приводит к увеличению затрат на обогащение и снижению сквозного извлечения металла [6–8], что в ряде случаев не позволяет рентабельно отрабатывать запасы, содержащиеся в весьма тонких жилах с использованием существующих технологий и оборудования.

Состояние вопроса и постановка проблемы

Ресурсосберегающие технологии освоения недр, прежде всего, должны быть реализованы при разработке месторождений ценного минерального сырья. Данные технологии должны обеспечивать по возможности полное использование всех вовлеченных в отработку ресурсов месторождения, а также уменьшение пересортицы и разубоживания извлекаемого из недр минерального сырья [9, 10].

Разработка массивов, сложенных скальными горными породами в настоящее время в основном ведется с применением взрывного рыхления, главным недостатком которого при разработке тонких рудных жил является ухудшение качества извлекаемого ценного минерального сырья в связи с его перемешиванием с околожилыми породами. Так, по данным [11] при разработке Коневинского золоторудного месторождения в процессе выемки жил средней мощностью 0,41 м при ширине очистного пространства 1,06–1,24 м разубоживание руды достигало 67 %, при этом содержание металла снижалось с 10,8 г/т в геологической руде до 3,5 г/т в добытой руде. Также неизбежны потери обогащенной рудной мелочи в породной части закладки при отбойке последующих слоев руды, в связи с чем в некоторых технологических схемах предлагается использование металлического настила, укладываемого на слой закладки в выработках, для уменьшения потерь рудной мелочи [5].

Для снижения потерь и разубоживания при разработке весьма тонких залежей отдельные участки наиболее богатых руд могут извлекаться механическим способом. В работе [12] предлагается технология выбуривания тонких жил скважинами диаметром 0,2–0,3 м. Недостатками данной технологии являются большие потери руды, оставляемой в межскважинных целиках, низкая производительность выемки и высокая удельная энергоемкость работ.

Для снижения удельной энергоемкости выемки полезного ископаемого из массива и повышения производительности разработаны технологические схемы с применением комбиниро-

ванного механического оборудования [13–15]. Известна технология отработки тонких залежей смешанным забоем с применением проходческого комбайна, оснащенного режущей головкой и гидравлическим молотом, при этом полезное ископаемое вынимается режущей головкой с образованием вруба, а более прочные вмещающие породы разрушаются гидравлическим молотом [13]. В работе [14] предлагается конструкция комбайна с комбинированным целевым рабочим органом, оснащенным дисковой фрезой для формирования в массиве отрезной щели и конической шарошкой для отрыва породных целиков, образуемых щелью. Недостатками рабочего оборудования комбайнов является невозможность селективной выемки весьма тонких рудных жил, а также низкая эффективность разработки скальных горных пород. Также процесс механического отрыва горных пород применяется в способе добычи каменных блоков из массива [16]. Способ заключается в бурении шпуров или скважин малого диаметра по линии будущего раскола, погружении в пробуренные выработки скважинных гидродомкратов с ориентированием их рабочих органов – пуансонов в сторону свободной поверхности каменного блока, создании отрывных усилий путем подачи рабочей жидкости в эластичные камеры гидравлических домкратов. Данный способ невозможно использовать для выемки тонкой рудной жилы без предварительного обнажения одного из ее бортов.

Известна комбинированная технология выемки тонких рудных жил [17], заключающаяся в нарезании щелей двумя отрезными дисками для оконтуривания жилы с последующим выламыванием полученного целика скалывающим диском. Затем производится нарезание щелей в околожилых породах с двух сторон от извлекаемой жилы с последующим выламыванием околожилых пород скалывающими дисками с целью формирования технологической выемки для размещения и последующего заглубления рабочего оборудования добычного комбайна. Комбинированная технология предусматривает восходящую механическую выемку тонкой жилы и околожилых пород, а также взрывное рыхление пустых пород с образованием горной выработки для размещения добычного комбайна. Недостатками данной технологии являются: многооперационность и низкая производительность механической выемки в связи с большим объемом работ по нарезанию щелей; высокие нагрузки на металлоконструкцию добычного комбайна

при выламывании целиков скалывающими дисками; возможность получения неровного скола при наличии трещин в массиве, что затруднит нарезание последующих щелей.

На Дальнем Востоке известен ряд золоторудных месторождений, существенная часть запасов которых сосредоточена в тонких и весьма тонких жилах. Некоторые из этих месторождений частично отработаны, например Кировское золоторудное месторождение, расположенное в Амурской области [18]. Отработка Кировского месторождения велась с применением традиционных технологий, было добыто 9,4 т золота при среднем содержании металла в руде 8,5 г/т. По данным различных источников к настоящему времени на месторождении известно от 300 до 500 золоторудных жил, из которых разведано около 70 жил и эксплуатировалась только 31 жила [18]. Мощность жил варьируется от 0,1 до 1,5 м при средней мощности 0,3 м, контакты жил четкие, при этом нередко разветвления и апофизы, падение рудных жил крутое и составляет 60–90 градусов в разные стороны, существенная часть запасов месторождения содержится в единичных кварцевых жилах мощностью 0,1–0,2 м [19, 20]. Содержание золота варьируется в значительных пределах: от 3 до 96 г/т, в отдельных случаях достигая 3 кг/т, золото также присутствует в околосильных породах с содержанием до 1,0–1,5 г/т на мощность до 0,8 м с обоих бортов залежи [19]. В настоящее время месторождение не осваивается, в том числе по причине отсутствия эффективной технологии извлечения минерального сырья из весьма тонких рудных жил.

Повысить эффективность горных работ и вовлечь в отработку (доработку) месторождения ценного минерального сырья, запасы которых сосредоточены в весьма тонких рудных жилах, возможно за счет применения новых технологических решений, основанных на соблюдении условия ресурсосбережения. Рассмотренные выше методы механической выемки тонких рудных тел посредством выбуривания или выпиливания имеют низкую производительность, высокую энергоемкость работ, ограниченную функциональность или сопряжены с большими потерями минерального сырья в недрах. Перспективным направлением, обеспечивающим повышение производительности, снижение энергоемкости и уменьшение потерь руды при разработке весьма тонких жил, является комбинированный способ выемки, сочетающий нарезание щелей с последующим скалыванием

окоптуренных целиков [17], который, однако, также имеет ряд недостатков, указанных выше.

Целью исследования является обоснование ресурсосберегающего способа отработки весьма тонких рудных жил, обеспечивающего повышение производительности и надежности локальной механической выемки, снижение нагрузок на металлоконструкцию комбайна, в сравнении с известной комбинированной технологией.

Результаты исследования

Для обоснования возможности реализации механической выемки весьма тонких жил с предварительным нарезанием щелей в Институте горного дела ДВО РАН были проведены экспериментальные исследования на образцах околосильных пород (гранодиоритов) одного из дальневосточных золоторудных месторождений, разрабатываемого подземным способом. В процессе исследований были определены прочность образцов околосильных пород на одноосное сжатие, производительность и энергоемкость процесса нарезания щелей отрезным диском в образцах околосильных пород.

Цилиндрические образцы гранодиоритов, для проведения испытаний по определению прочности на одноосное сжатие, вырезались из геолого-разведочных кернов диаметром 63 мм на отрезном станке Geocat производства фирмы Metkon instruments Ltd (Турция). Мощность электродвигателя отрезного станка составляет 4,3 кВт, диаметр отрезного диска равен 300 мм. Всего было вырезано 12 образцов (по два образца из шести кернов), по одному образцу от каждого керна было использовано для проведения экспериментов по определению прочности, оставшиеся образцы использовались для нарезания в них щелей отрезным диском. Предел прочности гранодиоритов определялся методом одноосного сжатия образцов правильной формы плоскими плитами [ГОСТ 21153.2-84. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии]. Сжатие производилось на испытательной машине Toni PACT II производства фирмы Toni Technick Baustoffprüfsystem (Германия), по результатам экспериментальных исследований прочность образцов гранодиоритов на одноосное сжатие составила 182–218 МПа.

Нарезание щелей производилось в торцевой части цилиндрических образцов гранодиоритов по осевой линии на отрезном станке Geocat. Щели нарезались отрезным диском на глубину 60 мм с одновременным хронометражем процес-

са, время нарезания щели по осевой линии на разных образцах изменялось в пределах от 14,1 до 17,2 с, при этом среднее время резания составило $t_p=15,4$ с. На основании данных хронометража возможно определить производительность нарезания щелей отрезным диском по формуле

$$\Pi = \frac{s_{\text{щ}}}{t_p} = \frac{d \cdot h}{t_p}, \quad (1)$$

где $s_{\text{щ}}$ – площадь нарезанной щели, см^2 ; d – диаметр образца, см ; h – глубина щели, см .

Исходя из геометрических параметров образцов и результатов хронометражных наблюдений, производительность нарезания щели составила $2,45 \text{ см}^2/\text{с}$ или $0,882 \text{ м}^2/\text{ч}$. На одном из образцов дополнительно к осевой торцовой щели была нарезана параллельная щель по хорде с формированием оконтуренного щелями целика околосильных пород (рис. 1).

Энергоемкость процесса нарезания щели может быть определена по формуле

$$e = \frac{N}{\Pi}, \quad (2)$$

где N – мощность на привод отрезного диска, кВт; Π – производительность нарезания щелей, $\text{м}^2/\text{ч}$.

С учетом мощности привода отрезного станка и производительности нарезания щелей в образцах энергоемкость процесса составляла $4,87 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$. Полученные экспериментальные результаты по производительности и энергоемкости процесса нарезания щелей в прочных околосильных породах можно считать удовлетворительными для обеспечения реализации предлагаемого ниже способа.



Рис. 1. Образец околосильных пород с нарезанными щелями

Fig. 1. Sample of vein rocks with cut slots

Распределение золота в жилах носит нелинейный характер – от десятых долей грамма до сотен грамм на тонну руды [11]. При наличии в весьма тонкой жиле локальных зон с высокими содержаниями ценного компонента в руде целесообразно вести их высокоселективное механическое извлечение. Институтом горного дела ДВО РАН предлагается ресурсосберегающий способ комбинированной выемки, обеспечивающий существенное повышение производительности и уменьшения энергоемкости работ за счет двукратного сокращения количества нарезанных щелей в сравнении с технологией, представленной в работе [17]. Предлагаемый способ реализуется следующим образом. В подземной горной выработке 1, проходящей по простиранию весьма тонкой жилы 2, устанавливается усовершенствованный комбайн, включающий оборудование для нарезания щелей в массиве и оборудование для выламывания оконтуренного целика 3 жилы 2, которое закреплено на раме 4 (рис. 2, а). Рама 4 поворачивается гидроцилиндром 5 в поперечной плоскости для позиционирования оборудования с учетом угла падения жилы 2. Нарезание щелей в массиве осуществляется двумя отрезными дисками 6, 7, установленными на расстоянии b , равном мощности оконтуриваемого щелями целика 3 жилы 2, на поворотной балке 8, внутри которой расположена цепная передача 9, а также привод 10 для вращения отрезных дисков 6, 7. При нарезании щелей 11, 12 усовершенствованный комбайн движется вдоль горной выработки 1. После оконтуривания целика 3 жилы 2 в одну из щелей в автоматическом режиме посредством поворотного рычага 13 устанавливается эластичный домкрат 14, при этом позиционирование эластичного домкрата 14 в щели 11 осуществляется посредством поворотного кронштейна 15 с гидроцилиндром 16.

Известна конструкция малогабаритного прямоугольного эластичного домкрата, позволяющего развивать существенные усилия [22]. Эластичный домкрат состоит из резиновой герметизирующей камеры прямоугольной формы, капронового каркаса и резинового покровного слоя при размерах герметизирующей камеры $0,25 \times 0,40$ м и давлении газа 1,2 МПа, распорное усилие будет составлять порядка 120 кН. Эластичный домкрат 14 действует равномерно по всей боковой поверхности 17 целика 3 и обеспечивает скол целика 3 у его основания 18. Усилие,

создаваемое эластичным домкратом 14, замыкается на стенки щели 11 и не приводит к нагружению металлоконструкции комбайна. Выломанный целик 3 под действием силы тяжести перемещается по прорезаемой выемке 19 в накопительный контейнер 20 усовершенствованного комбайна. Выламывание целиков 3 производится последовательно с остановками и последующим перемещением комбайна вдоль горной выработки 1 на длину L отделяемого целика 3.

После отработки весьма тонкой жилы 2 на глубину h производится возвращение комбайна в

исходное положение, посредством поворотной балки 8 осуществляется подъем отрезных дисков 6, 7 на высоту, соответствующую глубине нарезания щелей h , и рабочий цикл повторяется. Последовательное заглубление отрезных дисков 6, 7 осуществляется до формирования прорезаемой выемки 19 на глубину H , после чего производится бурение шпуров 21, их зарядание и взрывание околожилльных пород 22 с образованием горной выработки 23 шириной B для последующего размещения усовершенствованного комбайна (рис. 2, б).

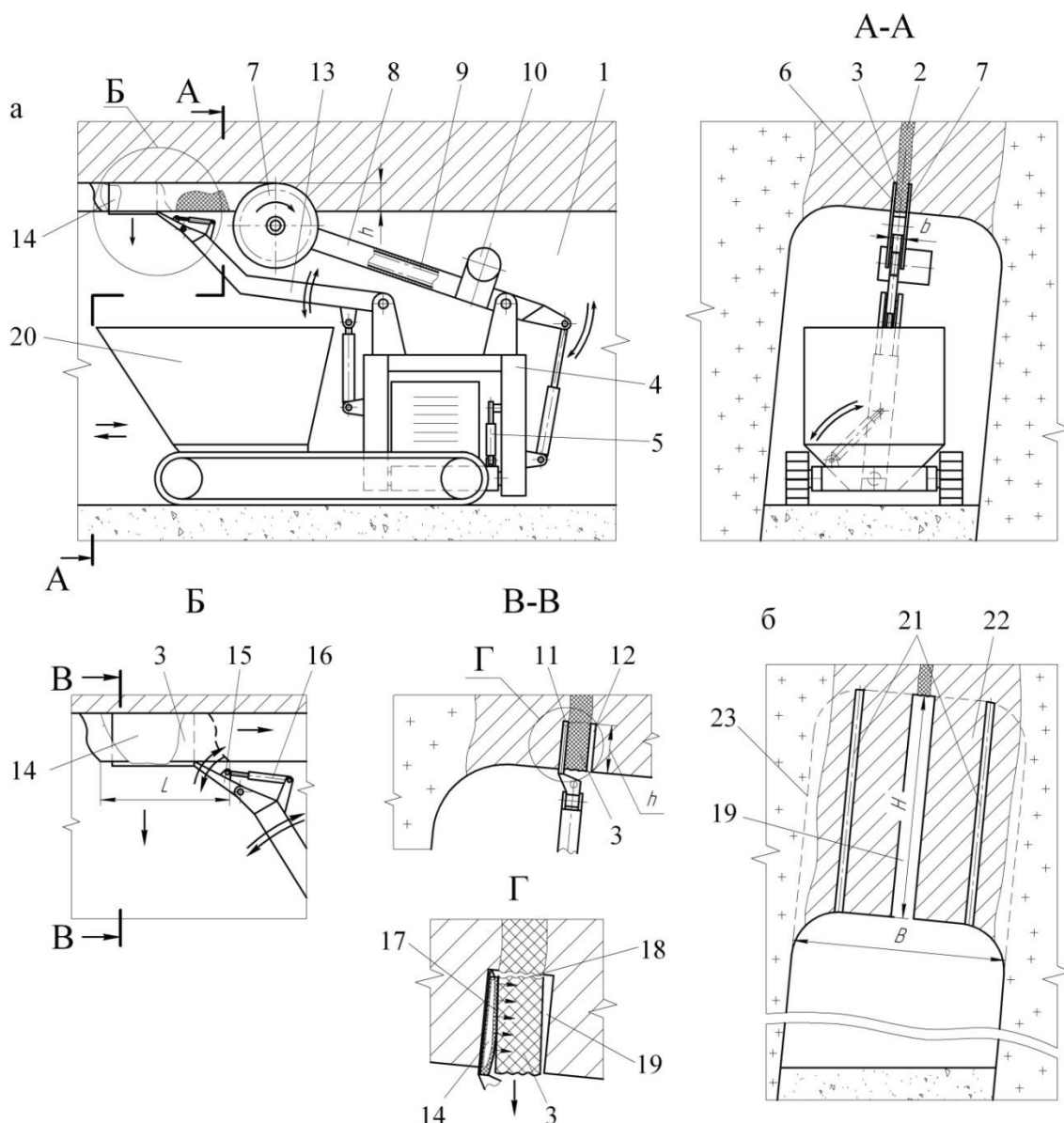


Рис. 2. Схема комбинированной выемки весьма тонкой рудной жилы и околожилльных пород:

а – нарезание щелей по границам жилы и отделение оконтуренного целика с применением усовершенствованного комбайна; б – подготовка околожилльных пород к взрывному рыхлению

Fig. 2. Combined mining of a very thin ore vein and vein rocks: а is cutting slots along the vein boundaries and breaking out the contoured pillar using the improved mining machine; б is preparation of vein rocks for explosive ripping

Богатая рудная масса весьма тонкой жилы, собранная в накопительном контейнере комбайна, перегружается на транспортное средство и отправляется на обогащательную фабрику, где после гравитационного обогащения и получения концентрата направляется непосредственно на плавку, что обеспечивает высокие показатели извлечения металла и компенсирует дополнительные затраты, связанные с локальной механической выемкой богатых участков жилы. Минерализованная горная масса, полученная из околожильных пород в процессе взрывного рыхления, поднимается на поверхность известными способами, направляется на дробление, после чего перерабатывается с применением кучного выщелачивания.

Укрупненные расчеты показывают, что предлагаемый комбинированный способ целесообразно использовать для выемки участков жил мощностью 0,1–0,2 м с содержаниями металла в руде 50–60 г/т и более. Так, при разработке рудной жилы мощностью 0,15 м с содержанием золота в геологической руде 50 г/т и в околожильных породах 1 г/т с применением традиционного взрывного способа рыхления при ширине очистного пространства 1,0 м разубоживание руды составит 85,0%, а содержание металла в добытой руде 8,35 г/т. В случае применения предлагаемой комбинированной технологии с прирезкой по бортам жилы околожильных пород мощностью ориентировочно по 1–2 см с каждой стороны объем околожильных пород, включенных в вырезаемый целик жилы, составит около 20 % объема оконтуренной руды, тогда разубоживание составит 16,7%, а содержание металла в отколотых целиках мощностью 0,18 м – 41,8 г/т. Весьма богатая руда может быть переработана с извлечением металла в концентрат равным 95%, извлечение металла из раздробленных околожильных пород в процессе кучного выщелачивания составляет 60–65%, таким образом, общее извлечение металла при комбинированной технологии составит 92,3% [22]. В то же время ориентировочное извлечение металла в концентрат из руды с содержанием 8,35 г/т, полученной после взрыва, составит не более 90% [22].

Удельная площадь нарезаемых щелей для локальной выемки 1 м³ весьма богатой руды жилы в виде целика по технологии-прототипу, представленной в работе [17], и предлагаемой технологии может быть определена по формуле

$$S_y = \frac{n + n_b}{b}, \quad (3)$$

где $n = 2$ – число щелей для оконтуривания целика; n_b – число вспомогательных щелей (для предлагаемой технологии $n_b = 0$, для технологии-прототипа $n_b = 2$); b – мощность оконтуриваемого щелями целика, м.

При мощности целика $b = 0,18$ м удельная площадь нарезаемых щелей по технологии-прототипу составит 22,2 м²/м³, а по предлагаемой технологии – 11,1 м²/м³. Таким образом, предлагаемая технология с применением усовершенствованного комбайна в сравнении с технологией-прототипом [17] позволит вдвое уменьшить количество и площадь нарезаемых щелей, что существенно повысит производительность локальной выемки богатой руды и снизит удельную энергоемкость процесса.

Оставшаяся часть жилы с меньшими содержаниями металла в руде извлекается посредством традиционных технологий, основанных только на взрывном рыхлении прочных горных пород.

Выводы

Использование ресурсосберегающего комбинированного способа по селективному извлечению наиболее богатых участков весьма тонких рудных жил с применением усовершенствованного комбайна позволяет существенно сократить количество нарезаемых щелей, снизить энергоемкость процесса подготовки прочных горных пород к выемке и увеличить производительность оборудования в сравнении с известной комбинированной технологией-прототипом. Применение эластичного домкрата для выламывания оконтуренных целиков повышает надежность и качество механической выемки, а также обеспечивает снижение нагрузок на металлоконструкцию комбайна. Высокоселективная механическая выемка путем вырезания наиболее богатых участков жилы позволяет максимально сократить потери ценного минерального сырья при добыче. Отсутствие взрывного воздействия на тонкую жилу исключает переизмельчение извлекаемой рудной массы, что повысит эффективность процесса ее последующей переработки. Раздельная переработка богатой рудной массы жилы и минерализованных вмещающих пород позволит получить более высокое общее извлечение металла из руд сложноструктурного массива в сравнении с традиционной технологией, основанной на применении взрыва.

Список литературы

1. Трубецкой К.Н., Шапарь А.Г. Малоотходные и ресурсосберегающие технологии при открытой разработке месторождений. М.: Недра, 1993. 272 с.
2. Espinoza R.D., Rojo J. Towards sustainable mining (Part I): Valuing investment opportunities in the mining sector // Resources Policy. 2017. Vol. 52. P. 7–18.
3. Чебан А.Ю. Способ и оборудование для открытой разработки маломасштабных крутопадающих месторождений // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т.15. №3. С. 18–23.
4. Гораш Ю.Ю. Развитие золотодобычи на Дарасунском руднике // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2004. № 11. С. 154–156.
5. Рогизный В.Ф., Хромов В.М. Селективная выемка маломощных рудных тел с применением малогабаритного самоходного оборудования // Рациональное освоение недр. 2019. № 2–3. С. 88–98.
6. Обоснование параметров рудничной сепарации рудничной массы при разработке медных месторождений Жезказганского региона / Юн Ю.А., Есина Е.Н., Рыльников А.Г., Гаджиева Л.А. // Известия Тульского государственного университета. Сер. Науки о Земле. 2019. № 3. С. 203–212.
7. Adams M.D. Gold Ore Processing: Project Development and Operations. Amsterdam: Elsevier, 2016, 980 p.
8. Jarvie-Eggart M.E. Responsible Mining: Case Studies in Managing Social & Environmental Risks in the Developed World. Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2015, 804 p.
9. Эффективность комбинирования технологий выемки руд в пределах рудного поля / Голик В.И., Лукьянов В.Г., Качурин Н.М., Стась Г.В. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 10. С. 32–39.
10. Kaplunov D.R., Ryl'nikova M.V. Principles of projecting mining-and-engineering systems for integrated mineral mining with a combined geotechnology // Journal of Mining Science. 2008. Vol. 44. No. 6. Pp. 578–584.
11. Павлов А.М., Васильев Д.С. Повышение эффективности подземной разработки тонких крутопадающих жил // Горная промышленность. 2017. № 1. С. 86–87.
12. Поздняков М.В., Михайлов Ю.В., Курбанмагомедов К.Д. Выбор безопасной технологической схемы добычи крепких маломощных руд выбуриванием // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2013. № 2. С. 52–55.
13. Лабутин В.Н. Применение комбинированного способа разрушения горных пород при проведении выработок смешанным забоем // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2016. Т. 3. № 2. С. 108–113.
14. Разработка малозахватных рабочих органов выемочных агрегатов типа ВСА для маломощных угольных пластов / Дмитрак Ю.В., Картавый А.Н., Картавый Н.Г., Серов В.А. // Горное оборудование и электромеханика. 2012. № 7. С. 2–7.
15. Yucong P., Quansheng L., Qi L. Full-scale linear cutting tests to check and modify a widely used semi-theoretical model for disc cutter cutting force prediction // Acta geotechnical. 2020. Vol. 15. No. 6. Pp. 1481–1500.
16. Несмеянов Б.В., Несмеянова Ю.Б., Горожанкин В.В. К вопросу отстройки бортов карьеров с использованием нетрадиционных способов и средств разрушения горных пород // Маркшейдерия и недропользование. 2012. № 6. С. 38–41.
17. Чебан А.Ю. Технология комбинированной выемки тонких рудных жил из массивов, сложенных прочными горными породами // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2021. № 1. С. 261–270.
18. Степанов В.А., Мельников А.В. Месторождения золото-сульфидно-кварцевой формации Приамурской провинции // Региональная геология и металлогения. 2016. № 68. С. 108–116.
19. Атлас многофакторных моделей золоторудных месторождений Дальнего Востока. Хабаровск: Изд-во Дальневосточного института минерального сырья, 2000. 204 с.
20. Минеральный состав и типоморфные особенности минералов золоторудных жил Кировского месторождения (Верхнее Приамурье) / Гвоздев В.И., Горячев Н.А., Вах А.С., Федосеев Д.Г., Семеняк Б.И. // Тихоокеанская геология. 2013. Т. 32. № 6. С. 40–51.
21. Пат. 2322383 Российская Федерация, МПК В66F 3/24, В66F 3/35, В66F 5/04. Пневматический домкрат / Е.С. Аникин, А.В. Лихарев, Б.Ф. Погорелый; заявитель и патентообладатель ФГУП НПП «Прогресс». № 2006135866/11; заявл. 10.10.2006; опубл. 20.04.2008.
22. Шумилова Л.В., Резник Ю.Н., Трубачев А.И. Переработка золотосодержащих руд методом кучного и кюветного выщелачивания: проблемы и перспективы развития. Чита: ЧитГУ, 2009. 388 с.

References

1. Trubetskoy K.N., Shapar A.G. *Malootkhodnye i resursosberegayushchie tekhnologii pri otkrytoy razrabotke mestorozhdeniy* [Low-waste and resource-saving technologies in open pit mining]. Moscow: Nedra, 1993, 272 p. (In Russ.)
2. Espinoza R.D., Rojo J. Towards sustainable mining (Part I): Valuing investment opportunities in the mining sector. Resources Policy, 2017, vol. 52, pp. 7–18.
3. Cheban A.Yu. Method and equipment for opencast mining of small steeply dipping deposits. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2017, vol. 15, no. 3, pp. 18–23. (In Russ.)
4. Gorash Yu.Yu. Development of gold mining at the Darasunsky mine. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy*

- byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2004, no. 11, pp. 154–156. (In Russ.)
5. Rogizny V.F., Khromov V.M. Selective mining of thin ore bodies using small self-propelled underground equipment. *Ratsionalnoe osvoenie nedr* [Mineral Mining & Conservation], 2019, no. 2–3, pp. 88–98. (In Russ.)
 6. Yun Yu.A., Esina E.N., Ryl'nikov A.G., Gadzhieva L.A. Substantiating mining separation parameters of mining mass by the development of Zhezkazgan region copper deposits. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Nauki o Zemle* [Izvestiya of Tula State University. Series: Earth Sciences], 2019, no. 3, pp. 203–212. (In Russ.)
 7. Adams M.D. Gold ore processing: project development and operations. Amsterdam: Elsevier, 2016, 980 p.
 8. Jarvie-Eggart M.E. Responsible mining: case studies in managing social & environmental risks in the developed world. Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2015, 804 p.
 9. Golik V.I., Lukyanov V.G., Kachurin N.M., Stas G.V. Efficiency of combining ore mining technologies within an ore field. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering], 2020, vol. 331, no. 10, pp. 32–39. (In Russ.)
 10. Kaplunov D.R., Ryl'nikova M.V. Principles of designing mining and engineering systems for integrated mineral mining with a combined geotechnology. *Journal of Mining Science*, 2008, vol. 44, no. 6, pp. 578–584.
 11. Pavlov A.M., Vasiliev D.S. Enhancing the efficiency of underground mining of steeply dipping thin veins. *Gornaya promyshlennost* [Mining Industry], 2017, no. 1, pp. 86–87. (In Russ.)
 12. Pozdnyakov M.V., Mikhailov Yu.V., Kurbanmagomedov K.D. Selecting a safe process flow diagram of mining thin ores by drilling. *Vestnik Severo-Kavkazskogo federal'nogo universiteta* [Newsletter of North Caucasus Federal University], 2013, no. 2, pp. 52–55. (In Russ.)
 13. Labutin V.N. A combined method of rock destruction in mixed face excavation. *Fundamentalnye i prikladnye voprosy gornykh nauk* [Basic and Applied Issues of Mining Sciences], 2016, vol. 3, no. 2, pp. 108–113. (In Russ.)
 14. Dmitrak Yu.V., Kartavy A.N., Kartavy N.G., Serov V.A. Development of low-cutting working tools of VSA type mining machines for thin coal beds. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika* [Mining Equipment and Electromechanics], 2012, no. 7, pp. 2–7. (In Russ.)
 15. Yucong P., Quansheng L., Qi L. Full-scale linear cutting tests to check and modify a widely used semi-theoretical model for disc cutter cutting force prediction. *Acta geotechnica*, 2020, vol. 15, no. 6, pp. 1481–1500.
 16. Nesmeyanov B.V., Nesmeyanova Yu.B., Gorozhankin V.V. On construction of open-pit sides with untraditional methods and equipment for disintegration of rock. *Marksheideriya i nedropolzovanie* [Mine Surveying and Subsoil Use], 2012, no. 6, pp. 38–41. (In Russ.)
 17. Cheban A.Yu. Technology of combined excavation of thin ore veins from masses packed by strong rocks. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Nauki o Zemle* [Izvestiya of Tula State University. Series: Earth Sciences], 2021, no. 1, pp. 261–270. (In Russ.)
 18. Stepanov V.A., Melnikov A.V. Deposits of gold-sulphide-quartz formation of the Amur province. *Regionalnaya geologiya i metallogeniya* [Regional Geology and Metallogeny], 2016, no. 68, pp. 108–116. (In Russ.)
 19. *Atlas mnogofaktornykh modeley zolotorudnykh mestorozhdeniy Dal'nego Vostoka* [Atlas of multifactor models of gold deposits in the Far East]. Khabarovsk: Publishing House of the Far Eastern Institute of Mineral Resources, 2000, 204 p. (In Russ.)
 20. Gvozdev V.I., Goryachev N.A., Vakh A.S., Fedoseev D.G., Semenyak B.I. Mineral composition and typomorphic features of minerals in gold veins of the Kirovskiy deposit (the Upper Amur region). *Tikhookeanskaya geologiya* [Russian Journal of Pacific Geology], 2013, vol. 32, no. 6, pp. 40–51. (In Russ.)
 21. Anikin E.S., Likharev A.V., Pogorely B.F. *Pnevmaticheskyy domkrat* [Pneumatic jack]. Patent RF, no. 2322383, 2008.
 22. Shumilova L.V., Reznik Yu.N., Trubachev A.I. *Perrabotka zolotosoderzhashchikh rud metodom kuchnogo i kyuvetnogo vyshchelachivaniya: problemy i perspektivy razvitiya* [Processing of gold-bearing ores by heap and vat leaching: problems and prospects of development]. Chita: ChitSU, 2009, 388 p. (In Russ.)

Поступила 07.12.2021; принята к публикации 11.01.2022; опубликована 25.03.2022
Submitted 07/12/2021; revised 11/01/2022; published 25/03/2022

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

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



ПИРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ СУЛЬФИДНЫХ МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ РУД С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ МЕТАЛЛОВ ПЛАТИНОВОЙ ГРУППЫ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Богатырев Д.М.¹, Петров Г.В.¹, Цымбулов Л.Б.²

¹Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

²ООО «Институт Гипроникель», Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Анализ современного состояния мирового производства металлов платиновой группы свидетельствует о том, что существенная доля металлов платиновой группы производится при переработке сульфидных медно-никелевых концентратов. В то же время отмечается многообразие технологических приемов переработки сульфидных медно-никелевых концентратов, характеризующихся различным уровнем содержания шлакообразующих примесей, различным содержанием драгоценных металлов, различным отношением меди к никелю, а также различной энергетической способностью сырья, определяемой, как правило, по содержанию серы в концентрате. При этом выбор оптимальной технологии переработки концентрата является ключевым фактором на технологические показатели процесса, в том числе на извлечение металлов платиновой группы в целевой продукт. **Используемые методы.** Аналитический обзор современного состояния пирометаллургических технологий переработки сульфидного медно-никелевого сырья с повышенным содержанием металлов платиновой группы. **Новизна.** 1. Произведен анализ технологических показателей пирометаллургических переделов переработки сульфидных медно-никелевых концентратов, содержащих металлы платиновой группы. 2. Приведены характеристики основных агрегатов, используемых при плавке на штейн медно-никелевого концентрата. 3. Сделана сравнительная оценка применяемых агрегатов на различных металлургических предприятиях мира при плавке медно-никелевых концентратов с повышенным содержанием металлов платиновой группы. **Результаты.** Рассмотрены технологии переработки высокосульфидных медно-никелевых концентратов, представленных в первую очередь на предприятиях России и Канады, а также высокомагнезиальных концентратов ЮАР. Установлено, что основным фактором, влияющим на выбор той или иной схемы переработки сульфидных медно-никелевых концентратов, содержащих металлы платиновой группы, является в первую очередь их минералогический состав. На основе проведенного анализа основных технологических показателей головных переделов предприятий, перерабатывающих сульфидные медно-никелевые руды с высокой концентрацией металлов платиновой группы, определены и обоснованы основные направления развития технологий переработки сульфидных медно-никелевых руд. Рассмотрены варианты пирометаллургической переработки концентратов в условиях интенсивного перемешивания расплава кислородно-воздушной смесью. **Практическая значимость.** На основе анализа основных технологических процессов пирометаллургической переработки сульфидных медно-никелевых руд, содержащих металлы платиновой группы, выявлены наиболее эффективные, к которым в первую очередь относятся автогенные барботажные процессы.

Ключевые слова: металлы платиновой группы, сульфидные медно-никелевые руды, автогенные процессы, обжиг в кипящем слое, плавка во взвешенном состоянии.

© Богатырев Д.М., Петров Г.В., Цымбулов Л.Б., 2022

Для цитирования

Богатырев Д.М., Петров Г.В., Цымбулов Л.Б. Пирометаллургические технологии переработки сульфидных медно-никелевых руд с высоким содержанием металлов платиновой группы: современное состояние и перспективы развития // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №1. С. 14–24. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-1-14-24>



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

PYROMETALLURGICAL TECHNOLOGIES FOR PROCESSING SULFIDE COPPER-NICKEL ORES WITH A HIGH CONTENT OF PLATINUM GROUP METALS: CURRENT STATE AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT

Bogatyrev D.M.¹, Petrov G.V.¹, Tsymbulov L.B.²

¹Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

²LLC Gipronickel Institute, Saint Petersburg, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). An analysis of the current state of world production of platinum group metals indicates that a significant proportion of platinum group metals are produced during the processing of copper-nickel sulfide concentrates. At the same time, there is a variety of technological methods for processing sulfide copper-nickel concentrates, characterized by different levels of slag-forming impurities, different contents of precious metals, different ratio of copper to nickel, as well as different energy capacity of raw materials, determined, as a rule, by the sulfur content in the concentrate. At the same time, the choice of the optimal concentrate processing technology is a key factor in the technological parameters of the process, including the extraction of platinum group metals into the target product. **Methods Applied.** An analytical review of the current state of pyrometallurgical technologies for processing sulfide copper-nickel raw materials with a high content of platinum group metals. **Novelty.** 1. The authors have analyzed technological indicators of pyrometallurgical processing of sulfide copper-nickel concentrates containing platinum group metals. 2. The paper contains characteristics of the main facilities used in matte smelting of copper-nickel concentrates. 3. The authors have made a comparative assessment of the facilities used at various metallurgical enterprises of the world for melting copper-nickel concentrates with a higher content of platinum group metals. **Results.** The paper describes processing technologies of high-sulfide copper-nickel concentrates, primarily presented at enterprises of Russia and Canada, as well as high-magnesia concentrates of South Africa. It has been established that a main factor influencing the choice of a particular schedule for processing sulfide copper-nickel concentrates containing platinum group metals is, first of all, their mineralogical composition. Having analyzed main technological indicators of the main divisions of enterprises, processing sulfide copper-nickel ores with a high concentration of platinum group metals, the authors determined and provided a rationale for main areas of development of technologies for processing sulfide copper-nickel ores. The paper presents options of pyrometallurgical processing of concentrates by intensive mixing of the melt with an oxygen and air mixture. **Practical Relevance.** Having analyzed main technological processes of pyrometallurgical processing of sulfide copper-nickel ores, containing platinum group metals, the authors identified the most efficient ones, which primarily include autogenous bubbling processes.

Keywords: platinum group metals, sulfide copper-nickel ores, autogenous processes, fluidized-bed roasting, suspension smelting.

For citation

Bogatyrev D.M., Petrov G.V., Tsymbulov L.B. Pyrometallurgical Technologies for Processing Sulfide Copper-Nickel Ores with a High Content of Platinum Group Metals: Current State and Prospects of Development. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 1, pp. 14–24. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-1-14-24>

Введение

Сульфидные медно-никелевые руды и концентраты перерабатываются на металлургических предприятиях, расположенных в Канаде, Австралии, Китае, Южно-Африканской республике и России. Все они в той или иной степени содержат металлы платиновой группы, золото и серебро, однако разница в содержаниях благородных металлов в различных месторождениях весьма значительна. Кроме того, предприятия, перерабатывающие сырье различного состава, были введены в

эксплуатацию в разные годы и используют отличающиеся технологии. В настоящей статье рассмотрены известные варианты переработки сульфидных медно-никелевых руд, в составе которых присутствуют металлы платиновой группы: от плавки неподготовленных или агломерированных концентратов на бедные штейны до автогенных высокопроизводительных процессов с использованием кислородного дутья. Отдельно выделены предприятия, перерабатывающие концентраты, характеризующиеся повышенным содержанием металлов платиновой группы.

Технология «Обжиг в печах кипящего слоя – электроплавка огарка на штейн»

На смену процесса плавки необожженных медно-никелевых руд и концентратов в шахтных и отражательных печах и технологии, основанной на сочетании операций агломерации и плавки в электропечах, пришли в начале 60-х гг. XX века технологии, базирующиеся на окислительном обжиге сульфидных концентратов в печах кипящего слоя (КС) с последующей электроплавкой обожженного огарка на относительно богатый металлизированный штейн. По данной технологии работал ряд предприятий Канады.

Например, ее применяли на канадском заводе *Thompson*, введенном в эксплуатацию в 1960 г. и остановленном летом 2018 г. в связи с вводом в строй гидрометаллургического завода Long Harbor и переориентации переработки концентратов с рудника Voisey's Bay на этот завод. Концентрат (состав, %: Ni – 14; Cu – 0,3; Co – 0,3; Fe – 37; S – 29; MgO – 2,9) с содержанием 90% твердых смешивали с кремнийсодержащим флюсом и подавали в печь КС, где он частично окислялся. Печи КС имели диаметр в зоне кипящего слоя 5,5 м с расширением в верхней части печи до 6,4 м. Номинальная мощность печи составляла 55 т/ч. При обжиге удалялось 40% серы. Отдельно стоит отметить, что ориентировочно 75% огарка выносилось из печи и улавливалось в циклонах. Непосредственно из печи КС выгружалось только 25% огарка. Температура в кипящем слое составляла 600°C, в разгружаемом огарке 580°C. Содержание диоксида серы в газах печи КС составляло 25%, однако серная кислота не производилась, так как в этом районе нет в ней потребности. Газы проходили очистку в циклонах и электрофильтрах и выбрасывались в трубу. К моменту выброса газов в трубу концентрация диоксида серы в газах снижалась до 2%, что связано с разбавлением их воздухом.

В 2008 г. выбросы диоксида серы составили 217 тыс. т., выбросы твердой пыли с газами после электрофильтров, поступающими в дымовую трубу, составляли 735 т. Горячий огарок после обжига поступал в электропечь. На заводе эксплуатировалось две шестиэлектродные электропечи со средней рабочей мощностью 16 MW каждая. Размеры печи 11×32×6 м. В каждой печи производится около 30 т/ч штейна. Расход электроэнергии составляет 470 кВт·ч на тонну сухой твердой шихты. Штейн (состав, мас. %: Ni – 30; Cu – 1; Co – 1; Fe – 37; S – 27) продували в кон-

вертерах Пирса-Смита до фанштейна с содержанием 0,5% железа. Фанштейн разливали на аноды, которые поступали в цех электролиза никеля [1].

Аналогичная технология применялась на плавильном никелевом заводе *Falconbridge* одноименной компании. Сырьем для завода служила и служит медно-никелевая сульфидная руда района Садбери. В настоящее время ведется добыча медно-никелевой руды также на крайнем севере Канады в северном Квебеке на руднике Raglan. В настоящее время переработка рудного медно-никелевого концентрата на данном предприятии осуществляется по технологии «частичный окислительный обжиг концентрата в печах КС – плавка огарка в электропечах – конвертирование богатого металлизированного штейна» [2–5].

Подводя итоги рассмотрения работы двух канадских предприятий, следует отметить, что идеология «окислительный обжиг в печах КС – электроплавка огарка на металлизированный относительно богатый по сумме Cu+Ni штейн» пришла на смену шахтной и рудно-термической плавке концентратов и агломератов. При этом в существенной степени решались экологические проблемы и увеличивалась производительность предприятий. Потери цветных металлов со шлаками, разумеется, возрастали, так как плавка осуществлялась на более богатый штейн, но этот рост был не столь существенен, так как плавку осуществляли на металлизированный штейн, а это, как известно, снижает потери металлов со шлаком за счет высокой активности железа в таком штейне и высокой величине межфазного натяжения между штейном и шлаком, что минимизирует механические потери [6].

Технология взвешенной плавки

Данная технология нашла широкое применение на многих мировых предприятиях. Рассмотрим подробнее специфику некоторых из них.

На никелевом плавильном заводе *Harjavalta* (Финляндия), ранее принадлежавшем компании Outokumpu, а с 2004 г. – компании Boliden, технология взвешенной плавки Outokumpu применялась, начиная с 1959 г. В 1995 г. процесс плавки претерпел существенную модификацию – была внедрена новая технология, так называемый «процесс прямой плавки никеля Outokumpu» – «Direct Outokumpu Nickel» Smelting (DON), осуществляемая также в печи взвешенной плавки, что позволило увеличить произ-

водительность с 17 тыс. т никеля в год до 52 тыс. т/год. В результате плавки DON получают богатый штейн с 4–6% Fe и суммой цветных металлов до 70%. Отдельно стоит отметить, что плавильный завод *Harjavalta* в настоящее время является единственным предприятием в мире, работающим по данной технологии. Что касается металлов платиновой группы, то при переработке концентратов по технологии DON они эффективно коллектируются в штейновой фазе, а количество металлов платиновой группы, направляемых на обеднение, пренебрежимо мало [7].

Также одним из предприятий, применяемых в качестве головного передела для переработки медно-никелевых руд технологии взвешенной плавки, является австралийский завод *Kalgoorlie*. В настоящее время весь концентрат плавится в печи взвешенной плавки с электропечью, встроенной в отстойник печи. Печь имеет размеры 37 м в длину и 8 м в ширину. В ней установлено 4 концентратных горелки. Мощность печи 130–140 т/ч сухого концентрата. Обогащение дутья кислородом составляет 35%. Производительность по штейну с содержанием 34% суммы цветных металлов составляет 630 т/сут. Шлак содержит 33% SiO₂, 40% Fe, 6,3% Fe₃O₄, 7,1% MgO. Штейн конвертируется в конвертерах Пирса-Смита, их на заводе 3 размером 3,6×7,3 м. Шлак, содержащий 21% SiO₂, 55% Fe, 32% Fe₃O₄, возвращается в печь взвешенной плавки. Газы после очистки поступают на производство серной кислоты. Файнштейн содержит 69% суммы цветных металлов и характеризуется низким содержанием меди: отношение Ni:Cu составляет 37, отношение Ni:Co – 74. Извлечение никеля в файнштейн составляет 95,8%. Он направляется на рафинирование на заводы *Kwinana* той же компании и другие рафинировочные заводы [2].

Плавильный завод компании *BCL* в Ботсване, сданный в эксплуатацию в 70-х гг. прошлого века, также работает по технологии взвешенной плавки. В печи получают высокожелезистый штейн, содержащий 32% суммы цветных металлов, 33% Fe и 24% S. После чего штейн направляется на конвертирование в один из трех конвертеров Пирса-Смита. В свою очередь, шлак обедняется в двух трехэлектродных электропечах, после чего поступает в отвал. Сквозное извлечение никеля в файнштейн на данном предприятии составляет 90% [2].

На *Надеждинском металлургическом заводе* (НМЗ), находящемся в городе Норильске,

применяется взвешенная плавка смеси никелевых концентратов (мас. %: Ni – 10,3; Cu – 2,6; Fe – 39,4; Co – 0,41; S – 29,5; SiO₂ – 6,5; Al₂O₃ – 0,9; CaO – 0,7; MgO – 0,7) с получением штейна, содержащего 45–55% суммы Cu+Ni, после конвертирования получают файнштейн, который в виде медленно охлажденных слитков направляется на предприятия Кольского полуострова. Печные и конвертерные шлаки обедняются в электропечах, образующиеся штейны поступают на конвертирование с получением файнштейна. В ПВП и конвертерах перерабатывается «никелевый» шлак Медного завода. Одним из существенных достоинств плавильного производства на НМЗ является высокое извлечение цветных и драгоценных металлов за счет того, что в процессе обеднения в электропечь добавляется руда, которая оказывает сильный «промывающий» эффект при плавке. Оба эти фактора (загрузка руды и получение сильнометаллизированного штейна) обеспечивают низкое содержание никеля (0,13–0,14%), кобальта (0,1–0,11%) и, соответственно, драгоценных металлов в отвальных шлаках. По этому показателю НМЗ находится в мире на одной из передовых позиций, если сравнить этот завод с другими заводами, в голове которых используется взвешенная плавка [8].

Технологическая схема переработки медно-никелевого концентрата на канадском заводе *Copper Cliff* включает в себя взвешенную плавку, конвертирование штейна в конвертерах Пирса-Смита до файнштейна, медленное охлаждение файнштейна, дробление его и измельчение, магнитную сепарацию и разделение немагнитной фракции файнштейна обогачительными методами на медный концентрат и никелевый концентрат. На плавильном заводе *Copper Cliff* перерабатывается 3600 т/сут коллективного концентрата, содержащего 19,5–21% суммы никеля, меди и кобальта, 30–31,5% серы и 12% влаги. Отношение Cu:Ni меняется, но в среднем составляет 1:1, содержание кобальта обычно составляет 0,35%. На заводе *Copper Cliff* технология производства файнштейна была сформирована в окончательном виде без передела обеднения шлаков. За основу была принята идеология плавки на относительно бедный штейн, содержащий сумму Cu+Ni = 45% и оборотом конвертерного шлака через плавильную печь. Сравнительный анализ технологии *Copper Cliff* и Надеждинского завода показывает, что при близком качестве перерабатываемого рудного концентрата потери

цветных металлов со шлаками на Copper Cliff существенно выше и превышают по меди и никелю 0,4% для каждого металла. По содержанию металлов платиновой группы в шлаках печи кислородной плавки Copper Cliff информация недоступна. Известно только, что коллективный концентрат Copper Cliff существенно беднее норильских никелевых концентратов по платиновым металлам.

Характеристики печей взвешенной плавки, перерабатывающих сульфидные медно-никеле-

вые концентраты с высоким содержанием металлов платиновой группы, представлены в **табл. 1**. В целом следует отметить, что переход на автогенные технологии с применением кислородной плавки привел к получению более богатых штейнов и, соответственно, более богатых шлаков. Однако при правильно организованном обеднении шлаков извлечение цветных металлов может быть сохранено на высоком уровне, о чем свидетельствует опыт Надеждинского металлургического завода.

Таблица 1. Характеристики печей для взвешенной плавки медно-никелевых концентратов, содержащих металлы платиновой группы [9]

Table 1. Description of furnaces for suspension smelting of copper-nickel concentrates, containing platinum group metals [9]

Завод, страна, компания	Copper Cliff, Vale, Канада	Kalgoorlie, BHP Billiton, Австралия	BCL, Ботсвана	Jinchuan, Китай	НМЗ, Норникель, Россия	Harjavalta, Финляндия, Boliden
Ввод в строй, год	1993	1972	1973	1992	1981	1959
Процесс	Взвешенная плавка Inco	Взвешенная плавка Outotec со встроенной электропечью	Взвешенная плавка Outotec	Взвешенная плавка Outotec со встроенной электропечью	Взвешенная плавка Outotec	Взвешенная плавка Outotec
Ni в штейне, тыс. т/год	133	100	27	65	140–170 (2 печи)	38
Размеры (внутренние), м:						
Под (ширина×длина×высота)	8×30×9	8×37×3,5	8×22×4	7×32×3,5	10×31×6	7×19×2,6
Реакционная шахта:						
диаметр	Нет данных	7	8	6	8	4,6
высота над крышей отстойника	Нет данных	6	11	6	9	7,6
Число концентр. горелок	4 горизонт.	4	4	4	1	1
Аптейк:	Квадратный	Нет данных	Нет данных	Нет данных	Круглый	Нет данных
диаметр	4×4	3,5×8	5	3	Нет данных	Нет данных
высота над крышей отстойника	15	7	17	7	Нет данных	Нет данных
Кампания, лет	2–3	10	9	8	5	10
Сырье						
Сухой концентрат, т/ч	125	140	120	50	150	45
Состав, %	Ni-10 Cu-12 Co-0,3 Fe-39 S-34	Ni-15 Cu-0,3 Co-0,4 Fe-34 S-32	Ni-5 Cu-4 Co-0,2 Fe-43 S-31	Ni-9 Cu-4 Co-0,2 Fe-38 S-27	Ni-9 Cu-4 Co-0,5 Fe-44 S-33	Ni-15 Cu-0,8 Co-0,4 Fe-30 S-29

Окончание табл. 1

Завод, страна, компания	Copper Cliff, Vale, Канада	Kalgoorlie, BHP Billiton, Австралия	BCL, Ботсвана	Jinchuan, Китай	НМЗ, Норникель, Россия	Narjavalta, Финляндия, Boliden
Дутье						
Температура, °C	Температура окружающей среды	500	260	Нет данных	Температура окружающей среды	Температура окружающей среды
O ₂ , объемные %	96	35	31	42	70	75
Скорость потока, нормальные м ³ /ч	14000	85000	150000	33000	60000	7000
Питание кислородом, т/ч	11	25	40	12	40–50	4
Продукция						
Штейн, т/ч	65	25	25		25–35	5
Состав штейна, %	Ni–23 Cu–25 Co–0,6 Fe–24 S–26	Ni–47 Cu–1,5 Co–0,8 Fe–20 S–27	Ni–17 Cu–15 Co–0,4 Fe–33 S–25	Ni–29 Cu–15 Co–0,6 Fe–29 S–23	Ni–33 Cu–14 Co–0,5 Fe–23 S–27	Ni–65 Cu–5 Co–0,7 Fe–5 S–22
Шлак, т/ч	120	70	110	50	160	20
Состав шлака, %	Ni–0,4 Cu–0,4 Co–0,2 Fe–43 SiO ₂ –36	Ni–0,7 Cu–0,1 Co–0,2 Fe–40 SiO ₂ –33	Ni–1,5 Cu–1,3 Co–0,1 Fe–40 SiO ₂ –28	Ni–0,35 Cu–0,35 Co–0,1 Fe–41 SiO ₂ –36	Ni–0,13 Cu–0,12 Co–0,11 Fe–40 SiO ₂ –34	Ni–0,3 Cu–0,2 Co–0,5 Fe–38 SiO ₂ –29
Отходящий газ						
Скорость потока, нормальные м ³ /ч	26000	Нет данных	100000	60000	60 000	16000
SO ₂ , объемные % на выходе из печи	55	Нет данных	7,2	8	35	30
Направление SO ₂	Нет данных	Производство H ₂ SO ₄	Производство H ₂ SO ₄	Производство H ₂ SO ₄	Производство H ₂ SO ₄	Производство H ₂ SO ₄
Температура, штейн/шлак/газ, °C	1210/1280/1350	1170/1300/1400	1160/1240/1400	1320/1380/1380	1150/1250/1150	1360/1400/1400
Подача топлива						
Кол-во углеводородного топлива, сгорающего в час	340 нормальных м ³ природного газа + 1,4 т кокса	1,5 м ³ нефти	6 т угля	1,3 м ³ нефти + 0,8 т угля	До 6000 нормальных м ³ газа в час	1 т сырой нефти
Электроэнергия	Нет данных	6,25 МВт, 6 электродов	0	5 МВт, 6 электродов	Нет данных	Нет данных

Технология барботажной плавки

В настоящее время технология автогенной барботажной плавки для переработки медно-никелевых концентратов применяется на одном заводе в мире – китайском заводе *Jinchuan*. В 2005 г. компания Jinchuan Nonferrous Metals заключила контракт с компанией Ausmelt на по-

ставку новой технологии плавки. Завод начал работать по новой технологии в августе 2008 г. и очень быстро достиг проектных показателей. Проектная мощность новой плавильной печи Ausmelt составляет 1,3 млн т/год концентрата. Эта технология впервые применена в никелевой промышленности. Шлак и штейн из печи Ausmelt непрерывно подаются в работавшую

ранее электропечь, где происходит обеднение шлака углем и одновременно оттаивание расплавов с образованием штейна и шлака. Площадь пода печи – 220 м², мощность – 15 МВт. Образующийся штейн содержит 35–40% суммы меди и никеля. Шлак характеризуется повышенным содержанием цветных металлов (по 0,3–0,4% Ni и Cu) [2, 9, 10]. Несколько лучший результат следовало бы ожидать в случае использования вместо агрегата Ausmelt однозонной печи Ванюкова, так как ее конструкция позволяет разделить шлако-штейновую эмульсию на шлак и штейн в сифонных устройствах, что предполагает более низкий уровень механических потерь в связке «барботажная печь – электропечь обеднения».

Электроплавка необоженных концентратов с повышенным содержанием металлов платиновой группы

Как отмечалось выше, отдельное место в способах переработки медно-никелевых концентратов занимает технология плавки необоженных низкосернистых концентратов, характеризующихся высоким содержанием металлов платиновой группы, а также высоким содержанием таких тугоплавких компонентов, как MgO и Cr₂O₃. Ряд плавильных заводов Южно-Африканской республики и один завод в США выбрали ее для извлечения платиноидов. Технические характеристики печей для плавки необоженных концентратов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Характеристики печей для плавки необоженных концентратов с высоким содержанием металлов платиновой группы [9]

Table 2. Description of furnaces for smelting of unroasted concentrates with a high content of platinum group metals [9]

Компания, страна	Polokwane (Anglo American Platinum), ЮАР	Rustenburg (Impala Platinum)	Lonmin, ЮАР	Northam, ЮАР	Zimplats, Зимбабве	Stillwater, США	Waterval (Anglo American Platinum), ЮАР	Mortimer (Anglo American Platinum), ЮАР
Печи:								
Количество и тип печи	1 прямоугольная	4 прямоугольные	1 круглая	1 прямоугольная	1 круглая	1 прямоугольная	2 прямоугольные	1 прямоугольная
Внешние размеры, м	29×10	26×8	Ø 11 м	26×9	Ø 12 м	9×5	26×8	25×7
Рабочие характеристики:								
Средняя рабочая мощность, МВт	68	35 и 38	28	15	12,5	5	34	20
Энергопотребление, кВт·ч/т	750–850	721	850	1000	900	900	700	820–850
Производительность, т/ч/печь	Нет данных	46	30	10	10	1	36	20
Сырье:								
Флюс	Известняк	Не добавляется	Нет данных	Нет данных	Известняк	Известняк, отработанные катализаторы	Известняк	Известняк
Примерный состав сырья, %	Ni–2,1 Cu–1,2 Co–0,04 Fe–12 S–5 MgO–18	Ni–1,7 Cu–1,1 Co–0,05 Fe–12 S–5 MgO–18	Ni–2,5 Cu–1,5 Co–0,13 Fe–17 S–6 MgO–17	Ni–2,5 Cu–1,3 Co–0,05 Fe–13 S–5 MgO–18	Ni–2,0 Cu–1,5 Co–0,07 Fe–13 S–6 MgO–24	Ni–5,3 Cu–3,2 Co–0,01 Fe–15 S–13 MgO–12	Ni–3,6 Cu–2,1 Co–0,08 Fe–16 S–9 MgO–20	Ni–2,2 Cu–1,1 Co–0,04 Fe–12 S–5 MgO–20
Конвертерный шлак	Нет данных	Нет данных	Нет данных	Нет данных	Нет данных	Гранулированный	Гранулированный	Нет данных

Окончание табл. 2

Компания, страна	Polokwane (Anglo American Platinum), ЮАР	Rustenburg (Impala Platinum)	Lonmin, ЮАР	Northam, ЮАР	Zimplats, Зимбабве	Stillwater, США	Waterval (Anglo American Platinum), ЮАР	Mortimer (Anglo American Platinum), ЮАР
Электроды:								
Количество	Нет данных	Нет данных	3	6	3	3	Нет данных	Нет данных
Диаметр, м	1,6	1,4	1,4	1,0	1,2	0,3	1,1	1,25
Расход массы, кг/т	3	2	2,6	2,6	3,1	3,5	2	Нет данных
Продукты плавки:								
Штейн, т/ч	Нет данных	5-6	4	1,8	1,2	0,14-0,25	7-8	3
Температура штейна, °С	1550	1300	1550	1400	1400	1200	Нет данных	1550
Состав, %	Ni-14 Cu-8 Co-0,3 Fe-40 S-30	Ni-14 Cu-9 Co-0,3 Fe-45 S-30	Ni-15 Cu-9 Co-0,5 Fe-43 S-28	Ni-16 Cu-8 Co-0,4 Fe-41 S-27	Ni-15 Cu-10 Co-0,7 Fe-43 S-28	Ni-17 Cu-11 Co-0,02 Fe-43 S-27	Ni-17 Cu-9 Co-0,5 Fe-41 S-27	Ni-12 Cu-7 Co-0,3 Fe-37 S-25
Переработка штейна	Непрерывное конвертирование	Конвертер Пирс-Смита	Конвертер Пирс-Смита	Конвертер Пирс-Смита	Конвертер Пирс-Смита	TBRC	Непрерывное конвертирование	Непрерывное конвертирование
Шлак, т/ч	Нет данных	41	Нет данных	Нет данных	Нет данных	Нет данных	36	14
Температура шлака, °С	1600	1460	1650	1500	1600	1500	1550	1650
Способ переработки	Грануляция и отвал	Грануляция, измельчение, флотация	Нет данных	Нет данных	Грануляция, отвал	Медленное охлаждение, измельчение, флотация	Грануляция, измельчение, флотация	Грануляция, измельчение, флотация
Состав, %	SiO ₂ -52 Fe-8 MgO-23	Ni-0,11 Cu-0,11 SiO ₂ -47 Fe-9 MgO-21	SiO ₂ -45 Fe-22 MgO-20	Ni-0,2 Cu-0,1 SiO ₂ -44 Fe-16 MgO-20	SiO ₂ -54 Fe-14 MgO-22	SiO ₂ -45 Fe-10 MgO-14	Ni-0,19 Cu-0,11 SiO ₂ -46 Fe-24 MgO-15	SiO ₂ -41 Fe-16 MgO-13
SO ₂ в отходящем газе, объемные %	0,5-1,5	0,9	Нет данных	Нет данных	0,1	4	0,5-1,3	0,5-1,0
Способ утилизации газов	Производство H ₂ SO ₄	Производство H ₂ SO ₄	Производство H ₂ SO ₄	Нет данных	Нет данных	Нет данных	Производство H ₂ SO ₄	Производство H ₂ SO ₄

Технология переработки богатых металлами платиновой группы медно-никелевых концентратов в ЮАР на штейн была изменена в 1990-х гг. Ранее эти концентраты сушили в сушилках Бюттнера до 7% влажности, измельчали и окомковывали в грануляторе диаметром 3 м. Получаемые окатыши диаметром 16 мм и влажностью 10% сушили до влажности 2% во вращающихся сушилках на нефтяном топливе, пе-

ремешивали с флюсами после весового дозирования и транспортировали в электропечь ленточным конвейером [11].

В настоящее время на всех плавильных заводах ЮАР компаниями *Anglo Platinum*, *Impala Platinum* и *Lonmin Plarinum* используется одна и та же технология плавки. В электропечи подается абсолютно сухой тонкий концентрат. Сушка ведется либо во взвешенном состоянии (Anglo

Platinum, Lonmin Platinum), либо в распылительной сушилке (Impala Platinum). На всех предприятиях, перерабатывающих концентраты в электропечах, плавка ведется на бедный неметаллизированный штейн, содержащий в сумме 20–30% цветных металлов. Как и следовало ожидать, шлаки содержат низкие концентрации меди и никеля (содержания платиновых металлов не публикуются). Однако даже в этом случае как минимум половина предприятий использует флотацию шлаков. Цели этой флотации очевидны – доизвлечь именно платиновые металлы, основная часть которых теряется, прежде всего, с сульфидными королями, не осевшими из шлака. Предположительно, что шлак содержит значительные количества именно мелкой сульфидной взвеси, так как плавке подвергается мелкий флотационный концентрат, а электропечи не способны обеспечить коалесценцию этих капель из-за отсутствия в них барботажа расплава. Таким образом, не очевидно, что выбор для данного типа концентратов рудно-термической плавки является оптимальным решением. С одной стороны, выбор электропечного способа понятен и обоснован наличием в концентратах высокой концентрации MgO , с другой – не все концентраты являются тугоплавкими, как, например, концентрат, перерабатываемый на Stillwater, содержащий всего 12% MgO .

Выводы

1. Анализ промышленной практики предприятий по пирометаллургической переработке медно-никелевых концентратов, содержащих металлы платиновой группы, свидетельствует, что головными технологическими переделами являются:

- обжиг в печах КС (или агломерация) с последующей плавкой обожженного продукта в электропечах с получением штейнов, содержащих $Cu+Ni \sim 30\text{--}50\%$;

- плавка во взвешенном состоянии (взвешенная плавка Outotec и кислородно-факельная плавка Inco) с получением штейнов, содержащих $Cu+Ni \sim 30\text{--}70\%$;

- плавка в печах с барботируемой жидкой ванной (Ausmelt, плавка Ванюкова) с получением штейнов, содержащих $Cu+Ni \sim 45\text{--}70\%$;

- электроплавка необоженных концентратов (сухих мелких и брикетированных) с получением штейнов, содержащих $Cu+Ni \sim 15\text{--}30\%$.

2. Переработка сульфидных концентратов в электропечах сопряжена с рядом существенных

недостатков, к которым относятся низкая удельная производительность агрегатов, высокий расход электроэнергии, а также высокий уровень механических потерь цветных и платиновых металлов со шлаками, о чем свидетельствует применение флотации шлаков на многих заводах, работающих по данной технологии.

3. Наиболее перспективными и производительными являются барботажные автогенные процессы, отличительной чертой которых является полезное использование тепла, выделяющегося от окисления сульфидов. Кроме того, плавка в автогенном режиме позволяет получать богатые штейны, содержащие порядка 70% цветных металлов, при минимальных потерях благородных металлов.

Список литературы

1. Thompson smelter, refinery closing in 2018 // The Reminder. URL: <https://www.thereminder.ca/news/local-news/thompsonsmelter-refinery-closing-in-2018-1.2119225>.
2. Warner A.E.M., Diaz C.M., et al. JOM: World Nonferrous Smelter Survey. Part IV: Nickel: Sulfide // JOM. 2007. Vol. 4. Pp. 58–72.
3. Sulphuric acid on the WebTM. Knowledge for the Sulphuric Acid Industry // Acid Plant Database, 2016, February 23. Xstrata Nickel.
4. Crundwell F.K., Moats M., Ramachandran V. et al. Extractive Metallurgy of Nickel, Cobalt and Platinum-Group Metals // Elsevier Ltd. 2011, pp.199–214.
5. Schonwille R., Boinssault M., Ducharme D., Chenier J. et al. Update on Falconbridge's Sudbury nickel smelter. Nickel and Cobalt. Challenges in Extraction and Production // CIM. 2005. Pp. 479–498.
6. Ванюков А.В., Зайцев В.Я. Шлаки и штейны цветной металлургии. М.: Металлургия, 1969. 408 с.
7. Piskunen P., Avarmaa K., O'Brien H., Klemettinen L., Johto H. and Taskinen P. Precious Metal Distributions in Direct Nickel Matte Smelting with Low-Cu Mattes // Metallurgical and materials transaction, published online, 15 November 2017.
8. Кайтмазов Н.Г. Производство металлов за полярным кругом. М.: Антей лимитед, 2007. 296 с.
9. Онишин Б.П. Никелевые предприятия Китайской Народной Республики. М.: Руда и металлы, 1998. 77 с.
10. Aspola L., Matusiewicz R., Haavanlammi K., Hughes S. Outotec Smelting Solutions for the PGM Industry // Fifth International Platinum Conference "A catalyst for change". Sun City, South Africa, 17–21 September 2012, pp. 239–250.
11. Mostert J.C., Roberts P.N. Electric smelting of Ni-Cu concentrates containing platinum group metals at Rustenburg Platinum Mines Ltd. // TMS Paper selection. 1978. New York. The Metallurgical Society of AIME. paper 48, pp. 290–299.

12. Металлургия цветных металлов: учебник / Сизяков В.М., Бажин В.Ю., Бричкин В.Н., Петров Г.В.; под ред. В.М. Сизякова. СПб.: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2015. 392 с.
13. Петров Г.В., Грейвер Т.Н., Лазаренков В.Г. Современное состояние и технологические перспективы производства платиновых металлов из хромитовых руд. СПб.: Недра, 2001. 200 с.
14. Поведение платиновых металлов при переработке сульфидного медно-никелевого сырья / Цемехман Л.Ш., Цымбулов Л.Б., Пахомов Р.А., Попов В.А. // Цветные металлы. 2016. №11. С. 50–56.
15. Nakamura S., Sano N. Solubility of platinum in molten fluxes as a measure of basicity // Metallurgical and materials transactions B. 2010. V. 28. Pp. 103–108.
16. Wiraseranee C., Yoshikawa T., Okabe T., Morita K. Dissolution behavior of platinum in Na_2O – SiO_2 -based slags // Material transactions. 2014. V. 55. Pp. 1083–1090.
17. Wiraseranee C., Yoshikawa T., Okabe T.H., Morita K. Effect of Al_2O_3 , MgO and CuO_x on the dissolution behavior of rhodium in the Na_2O – SiO_2 slags // Journal of mining and metallurgy, section B: Metallurgy. 2013. V. 49. Pp. 131–138.
18. Александрова Т.Н., О'Коннор С. Переработка платинометаллических руд в России и Южной Африке: состояние и перспективы // Записки Горного института. 2020. Т. 244. №4. С. 462–473.
19. Теляков А.Н., Рубис С.А., Горленков Д.В. Разработка эффективной технологии переработки промышленного сырья, содержащего благородные металлы // Записки Горного института. 2011. Т. 192. С. 88–92.
20. Петров Г.В., Диаките М., Спыну А.Ю. Обзор способов вовлечения в переработку техногенных платиносодержащих отходов горно-металлургического комплекса // Обогащение руд. 2012. №1. С. 25–28.
21. Gorlenkov D.V., Gorlenkova I.V., Beloglazov I.I., Timofeev V.Y. Selection of complete recovery of precious metals in the processing of copper-nickel alloys in hydrometallurgical way // Materials science forum. 2018. V. 927. Pp. 190–194.
5. Schoncwille R., Boinsscault M., Ducharme D., Chenier J. et al. Update on Falconbridge's Sudbury nickel smelter. Nickel and Cobalt. Challengers in Extraction and Production. CIM, 2005, pp. 479–498.
6. Vanyukov A.V., Zaytsev V.Ya. *Shlaki i shteyny tsvetnoy metallurgii* [Slags and mattes of non-ferrous metallurgy]. Moscow: Metallurgy Publishing House, 1969, 408 p. (In Russ.)
7. Piskunen P., Avarmaa K., O'Brien H., Klemettinen L., Johto H., Taskinen P. Precious metal distributions in direct nickel matte smelting with low-Cu mattes. Metallurgical and materials transaction, published online: 15 November 2017.
8. Kaitmazov N.G. *Proizvodstvo metallov za polyarnym krugom* [Production of metals beyond the Polar Circle]. Moscow: Antey Limited, 2007, 296 p. (In Russ.)
9. Onishchin B.P. Nickel enterprises of the People's Republic of China. Moscow: Ore and metals, 1998, 77 p. (In Russ.)
10. Aspola L., Matusiewicz R., Haavanlammi K., Hughes S. Outotec smelting solutions for the PGM industry. Fifth International Platinum Conference “A catalyst for change”. Sun City, South Africa, 17–21 September 2012, pp. 239–250.
11. Mostert J.C., Roberts P.N. Electric smelting of Ni-Cu concentrates containing platinum group metals at Rustenburg Platinum Mines Ltd. TMS Paper selection, 1978, New York. The Metallurgical Society of AIME, paper 48, pp. 290–299.
12. Sizyakov V.M., Bazhin V.Yu., Brichtkin V.N., Petrov G.V. *Metallurgiya tsvetnykh metallov: uchebnik* [Non-ferrous metallurgy: textbook]. Saint Petersburg: National Mineral Resources University of Mining, 2015, 392 p. (In Russ.)
13. Petrov G.V., Greyver T.N., Lazarenkov V.G. *Sovremennoe sostoyanie i tekhnologicheskie perspektivy proizvodstva platinovykh metallov iz khromitovykh rud* [Current state and technological prospects for the production of platinum metals from chromite ores]. Saint Petersburg: Nedra, 2001, 200 p. (In Russ.)
14. Tsemekhman L.Sh., Tsymbulov L.B., Pakhomov R.A., Popov V.A. Behavior of platinum metals during sulfide copper-nickel raw materials processing. *Tsvetnye metally* [Non-Ferrous Metals], 2016, no. 11, pp. 50–56. (In Russ.)
15. Nakamura S., Sano N. Solubility of platinum in molten fluxes as a measure of basicity. Metallurgical and materials transactions B, 2010, vol. 28, pp. 103–108.
16. Wiraseranee C., Yoshikawa T., Okabe T., Morita K. Dissolution behavior of platinum in Na_2O – SiO_2 -based slags. Material transactions, 2014, vol. 55, pp. 1083–1090.
17. Wiraseranee C., Yoshikawa T., Okabe T.H., Morita K. Effect of Al_2O_3 , MgO and CuO_x on the dissolution behavior of rhodium in the Na_2O – SiO_2 slags. Journal of mining and metallurgy, section B: Metallurgy, 2013, vol. 49, pp. 131–138.

References

1. Thompson smelter, refinery closing in 2018. The Reminder. Available at: <https://www.thereReminder.ca/news/local-news/thompsonsmelter-refinery-closing-in-2018-1.2119225>
2. Warner A.E.M., Diaz C.M. et al. JOM: World nonferrous smelter survey. Part IV: Nickel: Sulfide. JOM, 2007, vol. 4, pp. 58–72.
3. Sulphuric acid on the WebTM. Knowledge for the sulphuric acid industry. Acid Plant Database, 2016, February 23, Xstrata Nickel.
4. Crundwell F.K., Moats M., Ramachandran V. et al. Extractive metallurgy of nickel, cobalt and platinum group metals. Elsevier Ltd, 2011, pp.199–214.

18. Aleksandrova T.N., O'Connor C. Processing of platinum group metal ores in Russia and South Africa: current state and prospects. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of Mining Institute], 2020, vol. 244, no. 4, pp. 462–473. (In Russ.)
19. Telyakov A.N., Rubis S.A., Gorlenkov D.V. Developing an effective technology for processing of industrial raw materials containing noble metals. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of Mining Institute], 2011, vol. 192, pp. 88–92. (In Russ.)
20. Petrov G.V., Diakite M., Spynu A.Yu. Overview of ways to include in the processing man-made platinum-containing waste from the mining and metallurgical complex. *Obogashchenie rud* [Ore Dressing], 2012, no. 1, pp. 25–28. (In Russ.)
21. Gorlenkov D.V., Gorlenkova I.V., Beloglazov I.I., Timofeev V.Yu. Selection of complete recovery of precious metals in the processing of copper-nickel alloys in hydrometallurgical way. *Materials Science Forum*, 2018, vol. 927, pp. 190–194.

Поступила 13.12.2021; принята к публикации 21.01.2021; опубликована 25.03.2022
Submitted 13/12/2021; revised 21/01/2021; published 25/03/2022

Богатырев Дмитрий Михайлович – аспирант кафедры металлургии, Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия.
Email: dmitri.bogatyrev@gmail.com. ORCID 0000-0002-2297-6608

Петров Георгий Валентинович – доктор технических наук, профессор кафедры металлургии, Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия.
Email: petroffg@yandex.ru. ORCID 0000-0003-2382-5235

Цымбулов Леонид Борисович – доктор технических наук, профессор, директор департамента по исследованиям и разработкам, ООО «Институт Гипроникель», Санкт-Петербург, Россия.

Dmitrii M. Bogatyrev – postgraduate student of the Department of Metallurgy, Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia.
Email: dmitri.bogatyrev@gmail.com. ORCID 0000-0002-2297-6608

Georgii V. Petrov – DrSc (Eng.), Professor of the Department of Metallurgy, Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia.
Email: petroffg@yandex.ru. ORCID 0000-0003-2382-5235

Leonid B. Tsymbulov – DrSc (Eng.), Professor, Director of the Research and Development Department, LLC Gipronickel Institute, Saint Petersburg, Russia.

ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ И УТИЛИЗАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ И ОТХОДОВ RECYCLING OF MAN-MADE MINERAL FORMATIONS AND WASTE

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

УДК 622.17: 621.796.31/.34

DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-1-25-41



РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ХВОСТОХРАНИЛИЩА

Ляшенко В.И.¹, Воробьев А.Е.², Хоменко О.Е.³, Дудар Т.В.⁴

¹Украинский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт промышленной технологии, Желтые Воды, Украина

²Атырауский университет нефти и газа, Атырау, Республика Казахстан

³Национальный технический университет «Днепропетровская политехника», Днепр, Украина

⁴Национальный авиационный университет, Киев, Украина

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Приведены основные результаты исследований, проведенных с целью снижения воздействия на окружающую среду в зоне влияния хвостохранилища путем развития технологий и технических средств при складировании отходов добычи и переработки рудного сырья в виде твердеющих масс. **Цель исследования.** Анализ и оценка технологий и технических средств для складирования отходов обогащения руд у поверхностного хвостохранилища с добавкой отвердителя. Это обеспечит экологическую безопасность окружающей и гидрогеологической среды от загрязнений тяжелыми металлами и защиту населения, проживающего в зоне влияния поверхностного хвостохранилища. **Используемые методы.** Анализ работ в области складирования отходов гидрометаллургического завода, экологического и гидрогеологического мониторингов, опытно-промышленные и лабораторные экспериментальные исследования, математическое и физическое моделирование, а также теоретический анализ и обобщение результатов исследований по стандартным и новым методикам. **Новизна.** Предложена новая последовательность заполнения ячейки шламом не по всей ее площади, а наклонными слоями в направлении от одного борта ячейки к другому, обеспечивается стекание излишней воды по наклонным слоям смеси к сливному отверстию и слив (отвод) воды из ячейки через сливные отверстия без применения специальных стационарных или плавучих водозаборных механизмов. Описана новая технология и технические средства для складирования отходов обогащения руд и конструкция чаши для вновь строящегося хвостохранилища. **Результаты.** Показано, что при заполнении связанными хвостами всей существующей площади зеркала хвостохранилища на высоту ~10 м продолжительность складирования составит более 50 лет. Рекомендовано сооружение водопроницаемого химически активного барьера, перекрывающего продукты выветривания кристаллических пород докембрия, в зоне которых идет значительная часть потока подземных вод. **Практическая значимость.** Существующий мониторинг гидрогеологической среды позволяет контролировать влияние поверхностных хвостохранилищ на водную среду региона. Это обеспечит экологическую безопасность окружающей и гидрогеологической среды от загрязнений тяжелыми металлами и защиту населения, проживающего в зоне влияния поверхностного хвостохранилища при гидропромышленном обогащении руд, добытой на месторождениях Российской Федерации, Республики Казахстан, Украины и других развитых горнодобывающих стран мира.

Ключевые слова: хвосты переработки, обогащение, горная технология, хвостохранилища, отверждение, экология, гидрогеология, безопасность, эффективность.

Благодарность. В организации создания, совершенствования и внедрения научных разработок принимали участие и оказывали содействие специалисты Кошик Ю.И., Масляков Г.А., Тархин Ю.Н., Худошина Н.А., Давыдов С.В., Ермолин Г.А., Лозинская А.А. и др.

© Ляшенко В.И., Воробьев А.Е., Хоменко О.Е., Дудар Т.В., 2022

Для цитирования

Развитие технологий и технических средств для снижения воздействия на окружающую среду в зоне влияния хвостохранилища / Ляшенко В.И., Воробьев А.Е., Хоменко О.Е., Дудар Т.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №1. С. 25–41. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-1-25-41>



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

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGIES AND TECHNICAL FACILITIES TO REDUCE THE ENVIRONMENTAL IMPACT IN THE AREA OF INFLUENCE OF THE TAILINGS DAM

Lyashenko V.I.¹, Vorobiev A.E.², Khomenko O.E.³, Dudar T.V.⁴

¹Ukrainian Research and Design Institute for Industrial Technology, Zhovti Vody, Ukraine

²Atyrau University of Oil and Gas, Atyrau, Kazakhstan

³National Technical University Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine.

⁴National Aviation University, Kyiv, Ukraine

Abstract. Problem Statement (Relevance). The paper presents main results of studies carried out to reduce the impact on the environment in the area of influence of the tailings dam by developing technologies and technical facilities for the storage of mining wastes and processing of ore raw materials in the form of solidifying masses. **The purpose of the study.** Is to analyze and evaluate technologies and technical facilities for storing ore dressing wastes near surface tailings dam with an added hardener. This will ensure ecological safety of environment and hydrogeological environment from pollution by heavy metals and protect the population living in the area affected by the surface tailings dam. **Methods Applied.** Analysis of studies in the field of waste storage of a hydrometallurgical plant, environmental and hydrogeological monitoring, pilot industrial and laboratory experimental studies, mathematical and physical modeling, as well as a theoretical analysis and generalization of research results using standard and new methods. **Novelty.** The paper proposes a new sequence of filling the cell with sludge not over its entire area, but with inclined layers in the direction from one side of the cell to the other one; excess water flows down the inclined layers of the mixture to the drain hole and the drain (drainage) of water from the cell through the drain holes is provided without the use of special stationary or floating water intake mechanisms. The paper describes a new technology and technical facilities for storing ore dressing wastes and a basin design for a newly constructed tailings dam. **Results.** It is shown that when the entire existing area of the tailings dam is filled with bounded tails to a height of ~ 10 m, the duration of storage will be over 50 years. It is recommended to build a water-permeable chemically active barrier overlapping the weathering products of crystalline rocks of the Precambrian, in whose zone there is a significant part of the flow of groundwater. **Practical Relevance.** The existing monitoring of hydrogeological environment makes it possible to control the influence of surface tailings dams on water environment of the region. This will ensure ecological safety of environment and hydrogeological environment from pollution by heavy metals and protect the population living in the area affected by the surface tailings dam during the hydro-industrial beneficiation of ores mined at the deposits of the Russian Federation, the Republic of Kazakhstan, Ukraine and other developed mining countries of the world.

Keywords: processing tailings, beneficiation, mining technology, tailings dam, solidification, ecology, hydrogeology, safety, efficiency.

Acknowledgement. Specialists Koshik Yu.I., Maslyakov G.A., Tarkhin Yu.N., Khudoshina N.A., Davydov S.V., Ermolin G.A., Lozinskaya A.A. and others took part and assisted in organizing the creation, improvement and implementation of scientific development.

For citation

Lyashenko V.I., Vorobiev A.E., Khomenko O.E., Dudar T.V. Development of Technologies and Technical Facilities to Reduce the Environmental Impact in the Area of Influence of the Tailings Dam. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 1, pp. 25–41. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-1-25-41>

Введение

В отечественной практике обращение с отходами гидрометаллургического завода (далее «хвосты ГМЗ») заключается в их складировании в специально оборудованных местах (хвостохранилищах), размещаемых как на территории рудоперерабатывающего предприятия (в пределах единой промплощадки), так и на уда-

лении от него на самостоятельной (отчужденной) территории. По способу укладки хвостов, действующие нормативные документы [1, 2] допускают три вида хвостохранилищ: намывные; наливные; комбинированные. При намывных хвостохранилищах основная часть ограждающей дамбы намывается из переработанного рудного материала. На наливных – дамба возводится из привозных или инертных местных

материалов, а пульпа заливается в образуемую чашу [3, 4].

Анализ мировой практики существующих тенденций в обращении с отходами переработки радиоактивных руд показывает, что перспективным способом создания хвостохранилищ является комбинированный, при котором отходы переработки укладываются в специально оборудованное естественное углубление с ограждающей дамбой, часть которой сооружается из инертных грунтов, а часть отсыпается из переработанного рудного материала в смеси с вяжущим [5, 6].

Недостатком существующей технологии отработки урановых месторождений является накопление на дневной поверхности в отвалах и хвостохранилищах большого количества отходов ГМЗ и пустой породы, что оказывает отрицательное воздействие на окружающую среду и население, которое вынуждено проживать в зоне влияния урановых объектов, особенно в условиях активного земледелия Кировоградской области. Один из путей снижения техногенной нагрузки в зоне влияния горнодобывающих предприятий – совершенствование технологий складирования хвостов после гидроциклонирования и добавки отвердителя [7, 8]. Поэтому актуальным является разработка технологий и технических средств для складирования отходов переработки рудного сырья в поверхностные хвостохранилища с добавкой отвердителя.

Одним из самых проблемных мест является технология складирования отходов переработки рудного сырья, согласно которой хвосты ГМЗ направляются по пульпопроводу в хвостохранилище в виде пульпы с соотношением по массе «твердое – жидкое»: 1 : 2. Жидкая фаза пульпы после отстаивания и осветления в хвостохранилище возвращается в технологический цикл на ГМЗ. Данная технология складирования имеет ряд недостатков [9, 10]:

- высокие единовременные капитальные затраты на строительство хвостохранилища на полную проектную мощность;

- большая вероятность миграции вредных химических веществ в подземные воды при повреждении защитных экранов основания или бортов хвостохранилища.

Данная работа является продолжением исследований, основные научные и практические результаты которых получены в ходе проведения научно-исследовательской работы «Исследование и разработка технологии и рецептов

твердеющих смесей из хвостов ГМЗ-2 для заполнения карт поверхностных хранилищ. Этап 1.5. Технология и рецепты твердеющих смесей их отходов ГМЗ-2 для заполнения карт поверхностного хранилища (заключительный)» (№ ГР 0108U008936, научный руководитель темы В.И. Ляшенко) и наиболее полно приведены в работах [11–15].

Объект исследования – технологии и технические средства для складирования отходов обогащения руд у поверхностного хвостохранилища с добавкой отвердителя для обеспечения охраны гидрогеологической и окружающей среды (в частности, жилая застройка, подрусловый поток р. Желтая, Украина и др.) [16, 17].

Цель исследования – анализ и оценка технологий и технических средств для складирования отходов обогащения руд у поверхностного хвостохранилища с добавкой отвердителя. Это обеспечит экологическую безопасность окружающей и гидрогеологической среды от загрязнений тяжелыми металлами и защиту населения, проживающего в зоне влияния поверхностного хвостохранилища.

Для реализации цели поставлены следующие задачи:

1. Выполнить технологический аудит технологий и технических средств для складирования отходов обогащения руд у поверхностного хвостохранилища.

2. Дать новую конструкцию чаши хранилища, обеспечивающей экологическую и гидрогеологическую безопасность складирования и хранения хвостов обогащения руд.

3. Предложить новую технологию и технические средства для складирования отходов обогащения руд у поверхностного хвостохранилища с добавкой вяжущего.

4. Показать экономическую эффективность и экологическую безопасность складирования отходов обогащения руд у поверхностного хвостохранилища с добавкой отвердителя.

Методология. Анализ работ в области складирования отходов гидрометаллургического завода, экологического и гидрогеологического мониторингов, опытно-промышленные и лабораторные экспериментальные исследования, математическое и физическое моделирование, а также теоретический анализ и обобщение результатов исследований по стандартным и новым методикам с участием авторов [18, 19].

Обсуждение и оценка полученных результатов

Одним из активных источников загрязнения окружающей среды продуктами обогащения руд являются хвостохранилища. В процессе оборудования хвостохранилищ на их поверхностях образуются обезвоженные участки большой площадью. В летние периоды поверхность нагревается до 60°C и сухой слой достигает толщины 30–50 см. Сухие хвосты представляют собой рыхлый песчаный материал, между частицами которого (кроме незначительных сил поверхностного натяжения, молекулярных, химических связей и силикатизации) нет устойчивых связей, например пыль. При скорости ветра 5 м/с и более поверхность хвостохранилища становится интенсивным источником выделения пыли.

Традиционный способ борьбы с пылью на сухих пляжах хвостохранилищ основан на закреплении пылящих поверхностей путем создания пленок или противэрозионных корок. Увлажнение является наиболее употребляемым способом борьбы с пылью. Увлажнение самого высокого (2500 м) хвостохранилища в мире Мауро на руднике Лос-Пеламбрес в Чили показано на рис. 1 [20].



Рис. 1. Хвостохранилище Мауро на медно-молибденовом руднике Лос-Пеламбрес в Чили
Fig. 1. The Mauro tailings dam at the Los Pelambres copper-molybdenum mine in Chile

Влажный пляж не пылит, однако влага иногда испаряется и такой пляж требует дополнительной подачи воды, что очень затратно. Кроме того, рекультивация таких хвостохранилищ будет затруднена из-за низкой прочности их поверхностей. На поверхность хвостохранилищ наносят закрепители. В хвостохранилищах наливного типа легкие фракции (иловая и глинистая) концентрируются в верхнем слое пляжей. В верхнем (10–20 мм) слое находится до 90% частиц этих фракций. Коэффициент фильтрации верхнего слоя составляет в среднем 0,02–0,03 м/сут. Из-за малой фильтрации проникновение закрепляющих растворов вглубь хвостов не происходит и нерастворимая корка не образуется. После высыхания на поверхности закрепителя образуется тонкая пленка, которая легко разрушается и смывается водой. Большая часть закрепляющего раствора уходит по трещинам или собирается в сформированных углублениях. Противэрозионная пленка является плоскостью скольжения с пониженными прочностными характеристиками – угол внутреннего трения и сцепление, что способствует разрушению дамб. Хвосты обогащения с различными наполнителями и добавками подвергаются природному выщелачиванию, продукты которого нарушают экосистемы окружающей среды (табл. 1).

Технологии с закреплением хвостов выщелачивания продуктами вторичной минерализации в течение 40 лет использовали при разработке уранового месторождения «Быкогорское» (Северный Кавказ) способом подземного шахтного выщелачивания 3-процентным раствором серной кислоты. В результате кольматационных процессов хвосты выщелачивания приобретали прочность 0,5–1,0 МПа [21, 22]. Авторами систематизированы технологии управления состоянием хвостохранилищ и предложена их классификация (табл. 2). Она отличается от ранее известных тем, что в качестве основного критерия принят показатель выноса реагентов в природу.

Таблица 1. Прочность закрепления поверхности хвостохранилища
Table 1. Strength of stabilizing the surface of the tailings dam

Технология закрепления массива	Прочность, МПа		
	Минимум	Максимум	Средняя
Глинизация	0,05	2,2	1,1
Цементизация	0,22	6,6	1,7
Силикатизация	0,10	10,0	3,2
Битумизация	0,10	2,0	1,2
Комбинированная с добавкой ПВА	0,10	3,3	1,4
Закрепление травами	Закрепление травами		
Карбонатизация	0,30	1,50	0,80
Химическое закрепление	0,30	0,46	0,67

Таблица 2. Классификация способов управления хвостохранилищами
 Table 2. Classification of tailings management methods

Технология обработки хвостов	Вариант	Достоинства	Недостатки
Верхнего слоя	Глинизация	Малые затраты, наличие материалов	Малая прочность
	Цементация	Высокая прочность	Высокие затраты
	Силикатизация	Высокая прочность	Сложность
	Карбонатизация	Простота, надежность, утилизация карбонатов	Сложная расконсервация
	Биозакрепление	Простота и доступность	В комбинации
	Кольматация без извлечения металлов	Простота, надежность, утилизация отходов	Загрязнение металлами и солями
Всего массива	Без извлечения металлов	Простота, надежность, утилизация продуктов электрохимии, экологичность	Не используется возможность утилизации с получением товара
	С извлечением металлов	Простота, окупаемость, экологичность	Нет

Технология пылеподавления. Пылеподавление осуществляется нанесением на пылящую поверхность битумной эмульсии тонким слоем. Расход битумной эмульсии составляет $0,12 \text{ кг/м}^2$, то есть для защиты требуемых, например, $1\,000\,000 \text{ м}^2$ пылящей поверхности дамбы необходимо около 120 т битумной эмульсии в год. Для приготовления 120 т эмульсии необходимо около 60 т битума, 60 т воды и эмульгатор 3,6 т. Приготовление битумной эмульсии выполняется с помощью специального генератора эмульсии. Срок действия защиты от пыления один год. Слой нанесенной эмульсии на намывном пляже не создает противифльтрационный экран, то есть не уменьшает устойчивость дамбы, не загрязняет фильтрационную воду нефтепродуктами или другими вредными веществами, а значит, экологически безопасен. В результате выполненных работ по пылеподавлению по данным санитарно-эпидемиологической службы содержание пыли в воздухе над и вокруг хвостохранилища ниже предельно допустимых концентраций. Для стационарного применения технологии необходимо следующее оборудование и сооружения: генератор эмульсии; склад битумной эмульсии; оборудование для загрузки и разгрузки эмульсии; автомобиль, трактор или вертолет; навесное оборудование для разбрызгивания эмульсии. Недостатком такой технологии является ее краткий срок действия (один год), а также низкая прочность поверхностного слоя хранилища, что затруднит процесс рекультивации данного хвостохранилища.

Технология пылеподавления на основе раствора природного бишофита. На сухих пляжах действующих хвостохранилищ ГОКов ОАО

«Арселор Миттал Кривой Рог» и ОАО «СевГОК», Украина, проведены промышленные исследования эффективности предложенной технологии закрепления поверхности хвостов на основе раствора природного бишофита (РПБ). Как показали промышленные исследования эффективности технологии, предложенной для закрепления сухих поверхностей действующих хвостохранилищ в условиях ОАО «СевГОК», Украина, наблюдается уменьшение загрязненности воздуха пылью от 4,6 до 17 раз (табл. 3).

Таблица 3. Результаты закрепления поверхности хвостохранилища ОАО «СевГОК»

Table 3. Results of stabilizing the surface of the tailings dam of OJSC Northern Mining and Processing Plant

Температура воздуха, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость ветра, м/с	Влажность хвостов		Запыленность воздуха, мг/м ³	
			Обработано РПБ	Контроль	Обработано РПБ	Контроль
-4,8	70	3,0-4,0	5,52	4,61	0,16	2,60
8	84	5,4-6,0	11,30	1,60	1,13	6,00
25	63	4,4-4,8	9,01	1,30	1,00	4,60
26	60	2,5-3,0	8,80	0,15	0,26	4,50
26	60	2,5	6,00	0,15	0,44	4,50

РПБ, в отличие от других средств, может использоваться на протяжении всего года и не нуждается в специальном оборудовании. Раствор на поверхности пляжей наносился гидромониторами, смонтированными на базе автомобилей БелАЗ-7648, которые, двигаясь по дамбам, закрепляли поверхность хвостов. Дальность дей-

ствия струи с учетом направления ветра находилась в пределах 50–120 м, что позволило обработать РПБ всю поверхность карты. Отдельные участки карт (в центре или недостаточно закрепленные) с экспериментальной целью обрабатывали с помощью распылителей, установленных на пожарные рукава.

Высота падения капель РПБ на поверхность карты превышала 1 м, оптимальные затраты приняты в пределах 1,5–2 л/м². Во время исследований на предприятиях было закреплено 9 карт общей площадью свыше 200 га. В ходе экспериментов установлено что использование РПБ с концентрацией (плотностью) не меньше 1250 кг/м³ имеет наиболее продолжительный эффект закрепления (не меньше 70 сут), поэтому при необходимости кратковременного закрепления можно уменьшить затраты за счет использования водного раствора с меньшей плотностью. Для определения оптимальной технологии промышленного использования раствора бишофита в условиях отвалного хозяйства ГОКов Кривбасса, Украина, и подбора наиболее рациональных схем нанесения раствора на участок закрепления была проведена серия промышленных исследований. Они показали, что для кратковременного закрепления поверхности хвостохранилищ в сухую погоду можно использовать закрепители на базе ГИПАНа, лигносульфоната, полиакриламида.

Технология пылеподавления по складированию отходов гидрометаллургической переработки руд. Так, с начала эксплуатации Желтореченского железорудного (1895 г.) и уранового (1951 г.) месторождений (Украина) образовались:

– 2 карьера – «Габаевский» и «Веселоивановский», 4 хвостохранилища – отработанный карьер бурых железняков (КБЖ), «Разбери» и «Терновская» и воронка обрушения – как следствие подземной разработки железорудного месторождения системами с принудительным обрушением руд и вмещающих пород (ГП «Вост-ГОК», г. Жёлтые Воды, Украина);

– балка «Щербаковская» (рис. 2) (ГП «Вост-ГОК», Петровский район, Украина).

По своему химическому составу твердая часть хвостов близка к исходной руде, из которой удалено основное количество урана, вследствие чего

их удельная радиоактивность снижается на 15%. В результате распада некоторых короткоживущих радионуклидов (²³⁰Th, ²²⁶Ra, ²¹⁰Pb, ²¹⁰Po, ⁴⁰K и др.) в хвостах остается до 70% первоначальной активности урановой руды. Характеристики хвостов ГМЗ приведены в табл. 4–6.

Под хвостохранилище для складирования хвостов ГМЗ использован отработанный карьер бурых железняков (КБЖ), состоящий из большой и малой чаш, разделенных перемычкой. Малая чаша хвостохранилища вытянутой формы длиной до 800 м, шириной 100–250 м. Глубина карьера в этой части 12–15 м, дно его врезано в верхненеоген-нижнечетвертичные красно-бурые глины на 2–5 м [23, 24]. Стенки карьера сложены средне-верхнечетвертичными лессовыми суглинками. Большая чаша (основной карьер) почти овальной формы в плане. По длинной оси чаша простирается с севера на юг на 1,2 км, а по короткой оси – с запада на восток на 300–500 м.

В карте №3 остался водоем (прудок-отстойник) с абсолютной отметкой водного зеркала 148,25 м, служащий для аварийного сброса хвостов ГМЗ. Общий объем хвостов, накопленных в хвостохранилище с начала его эксплуатации, составляет около 12,4 млн м³. Плотность хвостов в среднем составляет 1,73 т/м³, плотность в сухом состоянии 1,46 т/м³, плотность частиц – 2,67 т/м³. По гранулометрическому составу хвосты представлены песками мелкими, реже пылеватыми, местами супесями.



Рис. 2. Общий вид хвостохранилища в балке «Щербаковская» по складированию отходов гидрометаллургической переработки руд

Fig. 2. General view of the tailings dam in the Shcherbakovskaya ravine for storing waste from hydrometallurgical ore processing

Таблица 4. Химический состав хвостов ГМЗ

Table 4. Chemical composition of tailings of the leach plant

Компонент	U	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	ZrO ₂	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	H ₂ O
Содержание	0,01	61,16	17,08	1,25	2,16	0,095	0,4	0,04	0,20	3,64	1,12	0,42	9,28	0,04	0,16

Таблица 5. Физические характеристики хвостов ГМЗ
Table 5. Physical characteristics of tailings of the leach plant

Наименование показателей	Величина
Плотность хвостовой пульпы, г/см ³	-1,2
Плотность твердого в пульпе, г/см ³	-2,46–2,9
Плотность скелета, т/м ³	1,56
Влажность, %	26–30
Грансостав, %:	
+ 0,15 мм	4,0–8,0
- 0,15–0,074	22–30
- 0,074–0,043	34–44
- 0,043–0,005	30–40
- 0,005	2,1

Таблица 6. Содержание радионуклидов в хвостах ГМЗ
Table 6. Content of radionuclides in tailings of the leach plant

Наименование показателя	Содержание	
	Твердая фаза, Бк/дм ³ , твердая фаза, Бк/кг	Жидкая фаза, Бк/дм ³
Ra-226	454–12789	1,2–3,7
Th-230	2197–9768	0,09–0,38
Pb-210	8639–13634	0,05–0,24
Po-210	7955–11936	0,04–0,22
U-238	2516	0,02–0,10
Суммарная альфа-активность	1100–27800	–

Глубина карьера в этой части около 60–65 м, размеры дна составляли 600–150 м. Дно карьера врезано в докембрийские кристаллические породы. Борта карьера сложены (снизу вверх) полтавскими песками мощностью до 30 м, сарматскими песками и глинами песчаными мощностью до 15 м, глинами верхнечетвертичными мощностью до 15 м и средне-верхнечетвертичными лессовыми суглинками мощностью до 10 м. Хвостохранилище начали эксплуатировать с 1964 г. К 1982 г. произошло заполнение карьера отвальной пульпой ГМЗ, уровень воды достиг отметки 145,13 м, с этого времени оно используется как резервное.

Общая площадь хвостохранилища, включая дамбы, составляет 55 га. Территория хвостохранилища была разделена дамбами на шесть карт. В 1982–83 гг. были выполнены первые рекультивационные работы на площадке карты №5 (южная часть малой чаши). Затем территория карт №1, 4, 6 была покрыта слоем суглинка средней мощностью 0,5 м. В 1995–96 гг. выполнен первый этап рекультивации. В настоящее

время вся территория хвостохранилища покрыта рекультивационным слоем мощностью от 0,4 до 5,6 м (рис. 3).



Рис. 3. Горнотехническая рекультивация хвостохранилища в карьере бурых железняков
Fig. 3. Mining reclamation of the tailings dam in a brown iron ore quarry

Хвостохранилище расположено в 1,5 км к югу от г. Желтые Воды, Украина, в балке «Щербаковская» («Щ»), являющейся правым притоком реки Желтая. Абсолютные отметки поверхности земли изменяются от 142 м на водоразделе до 95 м в днище балки. Балка «Щ» является составной частью овражно-балочной сети реки Желтой и состоит из двух ответвлений – северного и западного. Ближайшими к хвостохранилищу водотоками являются реки Желтая и Зеленая, протекающие с севера на юг соответственно в 1,0–1,5 км восточнее и в 6,5–7,5 км западнее хвостохранилища [25, 26].

Хвостохранилище «Щ» является гидротехническим сооружением I класса и относится к экологически опасным объектам. Санитарно-защитная зона хвостохранилища – 1000 м. Используется как накопитель промышленных отходов гидрометаллургического завода (ГМЗ) с 1959 г. Оно наливное, балочно-равнинного типа, то есть ёмкостью для наполнения или чашей служит естественное понижение в рельефе. В настоящее время хвостохранилище состоит из двух секций (старая и новая).

Старое хвостохранилище сооружено путем перекрытия северного ответвления балки плотиной (в настоящее время разделительная дамба) и эксплуатировалось с 1959 по 1979 гг. Имеет длину 1,8 км, ширину 0,9 км, площадь 98,4 га, полезный объем около $5,4 \cdot 10^6$ м³. В верховье балки старое хвостохранилище ограждено отсечной дамбой с абсолютной отметкой гребня 138,4 м. Разделительная дамба имеет протяженность около 1,5 км, ширину по гребню 3–4 м. Абсолютные отметки гребня изменяются в пределах 138,0–140,8 м. Площадь водной поверхно-

сти на этот период равна 836 тыс. м², объем воды в пруде 2935 тыс. м³, средняя глубина пруда 3,51 м. В настоящее время используется как резервное.

Новое хвостохранилище имеет площадь 151,8 га. Проектный объем – 25,84·10⁶ м³. Ограждающее сооружение состоит из основной плотины, разделительной дамбы и ограждающих дамб и выполнено из уплотненных лессовых суглинков. Основная плотина ограждает новое хвостохранилище с востока. Общая протяженность плотины с бортами составляет 1,8 км. Профиль плотины одно-, двух- и трехъярусный; абсолютные отметки гребня изменяются от 138,0 до 139,1 м. Высота изменяется от 7,0 до 44,0 м в тальвеге балки.

Ограждающая дамба ограничивает новое хвостохранилище с юга и запада. Южный участок ограждающей дамбы имеет протяженность 1,5 км. Профиль одноярусный, абсолютные отметки гребня изменяются от 137,9 до 137,4 м. Высота дамбы варьирует в пределах 10,3–14,5 м. Западный участок ограждающей дамбы имеет протяженность 1,9 км; профиль одноярусный с изменяющейся высотой от 1,2 до 14,3 м.

В новом хвостохранилище имеется пруд-отстойник с абсолютной отметкой водной поверхности на июль 2006 г. 135,68 м и площадью водного зеркала 624 тыс. м². Объем воды в пруде составляет 1544 тыс. м³, средняя глубина пруда 2,47 м. Новое хвостохранилище эксплуатируется с 1979 г. по настоящее время. Заскладированные отходы находятся под слоем воды. В процессе заполнения хвостохранилища изменились гидродинамические и гидрохимические условия в районе, прилегающем к хвостохранилищу.

Технологии и технические средства для складирования отходов гидрометаллургической переработки руд с добавкой отвердителя. Для минимизации отрицательных влияний на окружающую среду во время строительства хвостохранилища, эксплуатации и хранения отходов предполагается:

- расположение хранилища в естественном понижении местности (балке), что с санитарно-экологической точки зрения является более благоприятным и обеспечивает наименьшую длину искусственных ограждающих дамб;

- строительство ограждающих дамб из естественных материалов – уплотненного суглинка;

- изоляция днища и внутренних откосов хранилища противодиффузионным экраном, который включает слой уплотненного суглинка и

полиэтиленовую пленку высокой плотности (геомембраны фирмы Engineering Dobersek GmbH, Германия типа НБРЕ G/G (для дна) и HDPE T/G (для откосов 1,0/2,5). Экран надежно защищает геологическую и гидрогеологическую среды от химического и радиоактивного загрязнения;

- хранение отходов гидрометаллургической переработки уранового сырья в иммобилизованном (связанном) состоянии, которое снижает вероятность миграции вредных химических веществ и естественных радионуклидов в окружающую среду;

- устройство водоотводных канав по периметру хранилища, которые исключают поступление дождевых вод в чашу хранилища с близлежащей территории;

- устройство санитарно-защитной зоны хранилища размером 1000 м, ее озеленение;

- поэтапное складирование отходов и рекультивация заскладированного участка;

- складирование и хранение плодородного слоя грунта и суглинка, который вынимается во время инженерной подготовки территории для дальнейшего использования их в строительстве и рекультивации заскладированного массива отходов;

- использование вентиляционного и очистного оборудования, орошение разрабатываемых грунтов с целью обеспечения соответствия загрязнения атмосферного воздуха санитарно-гигиеническим требованиям;

- своевременные сбор, хранение и утилизация образующихся промышленных отходов в соответствии с разработанными и согласованными лимитами предприятия в целом;

- рекультивация территории хранилища и близлежащей к нему территории после окончания эксплуатации;

- озеленение рекультивированной территории травяной и кустарниковой растительностью;

- постоянный мониторинг компонентов окружающей среды в зоне влияния хранилища.

Для создания монолитного массива иммобилизованных отходов планируется вести укладку смеси из обезвоженных хвостов и вяжущего «блоками». Для формирования «блока» на предварительно подготовленном основании хранилища отходов создается прямоугольное ограждение – «карта» из отходов горного производства (хвосты обогащения и пустая порода). Размеры «карты» создаются из условия укладки тридцатидневного объема подготовленных к иммобилизации

хвостов ≈ 138 тыс. м³, что при высоте 5 м составят 150×190 м. Ширина верхней поверхности сторон «карты» принималась 6 м из условий прокладки на ней бетонопровода и проезда техники, а ширина основания – 21 м (рис. 4).

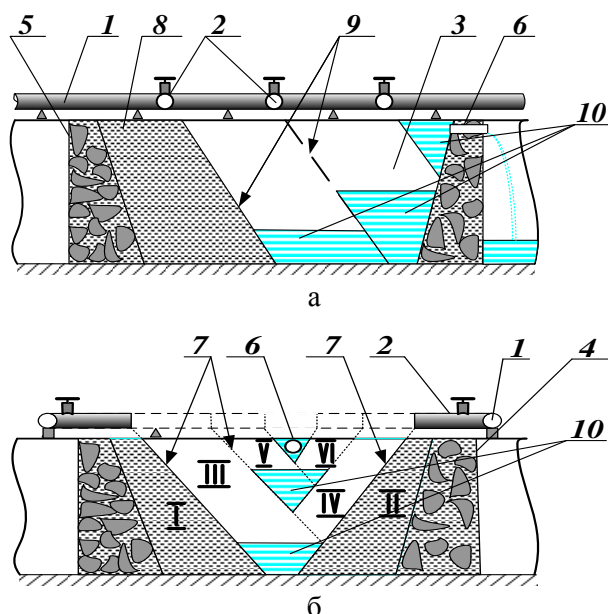


Рис. 4. Технологическая схема укладки отходов гидрометаллургического производства в поверхностные хвостохранилища: а, б – соответственно схемы укладки хвостов в продольном и поперечном направлениях ячейки шламохранилища: 1 – трубопровод; 2 – выпуски; 3 – ячейки хвостохранилища; 4, 5 – соответственно борта продольные и поперечные хвостохранилища; 6 – отверстия сливные; 7 – поверхность наклонная; 8, 9 – слои наклонные; 10 – жидкость пульпы; I–VI – номера участков

Fig. 4. Process flow diagram of laying waste from hydrometallurgical production in surface tailings dams: a, b are layouts of tailings in the longitudinal and transverse directions of the sludge storage cell, respectively: 1 is a pipeline; 2 is outlets; 3 are tailings dam cells; 4, 5 are longitudinal and transverse sides of the tailings dam, respectively; 6 are drain holes; 7 is an inclined surface; 8, 9 are inclined layers; 10 is pulp liquid; I–VI are section numbers

Для снижения трудоемкости отвода лишней воды из ячеек нового хвостохранилища и сокращения сроков их рекультивации, шламы по трубам подают в ячейки с бортов хранилища поочередно (см. рис. 4). После отвердения порции смеси в хранилище образуют наклонные слои, направленные навстречу друг другу и в сторону поперечно расположенного борта. По наклонным слоям вода стекает вниз ячейки, а каждый

последующий слой смеси вытесняет эту воду к поперечно расположенному борту. В дамбе поперечного борта выполнены сливные отверстия, через которые осуществляется слив лишней воды в последующую ячейку. После слива воды из ячейки отверстия закупаживают и с противоположного поперечно расположенного борта начинают рекультивацию ячейки хвостохранилища.

Для транспортирования и укладки смеси предусмотрены бетононасосы BSA1400HP-D производительностью 10² м³/ч и максимальной дальностью подачи 1300 м. С целью предотвращения схватывания готовой смеси в оборудовании и трубопроводах при неизбежных остановках необходимо использовать добавки, регулирующие процесс гидратации вяжущего.

По рекомендации фирмы Engineering Dobersek GmbH (Германия) при подготовке хвостов к отверждению их обезвоживают до получения пульпы с содержанием до 80% твердого компонента и направляют на смешение с цементом (вяжущим) в смеситель.

Для равномерного заполнения «блока» на обеих сторонах «карты» укладывают бетонопровод с необходимым количеством выпусков. Заполнение «блока» ведется из каждого бетонопровода. После заполнения «карты» производят укладку смеси в последующую, предварительно подготовленную «карту», а предыдущую после набора необходимой прочности рекультивируют. Создание «карт» для укладки смеси обезвоженных хвостов с вяжущим обусловлено несколькими факторами. Согласно практике укладки бетона, количество воды в 1 м³ смеси не должно составлять более 160–180 л, а в 1 м³ обезвоженных хвостов оно составляет 270–350 л. Излишки воды способствуют расслаиванию смеси при укладке и вымыванию из нее мелкой фракции, в том числе и большого количества вяжущего, что, в свою очередь, снижает прочность иммобилизованных хвостов.

Создание противофильтрационной дамбы в виде «карты» будет предотвращать бесконтрольное растекание шламовой части смеси и, в конечном итоге, способствовать созданию монолитного «блока». Формирование «блока» будет проводиться непрерывно в любое время года, и при обильных осадках вымывание вяжущего будет проходить интенсивней, а избыток воды может просачиваться через дамбу. Для сбора дождевых стоков, промывных вод из бетонопроводов, испарения избытка оборотных вод со сгустителей вниз по рельефу предусматривается прудок-испаритель. При укладке «блоков» в пе-

риод сильных морозов необходимо использовать добавки, повышающие морозостойкость смеси, а также уменьшать размеры «карт» с целью сохранения положительной температуры в «блоке», необходимой для набора прочности. Для улучшения прочностных характеристик иммобилизованных хвостов в состав смеси необходимо добавлять мелкую фракцию – 15 мм (отсев отходов горного производства).

Установка по получению отсева монтируется на борту хранилища. Для создания прочного массива и предотвращения разрушения верхнего слоя застывшего (затвердевшего) «блока» при укладке на него последующих слоев с применением техники расход вяжущего для иммобилизации хвостов принят как для приготовления бетона высоких марок.

Таким образом, установлена возможность использования твердеющих смесей с применением в качестве вяжущего цемента, доменного гранулированного шлака и золы, а в качестве наполнителя – хвостов ГМЗ для их иммобилизации при заполнении карт поверхностных хвостохранилищ, определена прочность, рецептура и последовательность укладки полученной твердеющей смеси в хранилище [27, 28].

Складирование отходов горно-металлургического производства в балке. Оно заключается в организации хранилища отвержденных отходов (рис. 5). С этой целью предусматривается разделение хвостовой пульпы на твердую и жидкую фазы. Жидкая фаза возвращается на ГМЗ в оборотный цикл, а твердая после обезвоживания на фильтрах смешивается с цементом и в виде цементного раствора укладывается на предварительно подготовленную поверхность хвостохранилища высотой до 10 м. После достижения необходимой прочности массив рекультивируется. Для предлагаемого складирования на территории хвостохранилища потребуются создание комплекса подготовки хвостов, состоящего из корпуса обезвоживания, склада обезвоженных хвостов, склада цемента, узла приготовления раствора, сгустителей, конвейерных галерей и вспомогательных сооружений. При заполнении связанными хвостами всей существующей площади зеркала хвостохранилища на высоту ~10 м продолжительность складирования составит более 50 лет. Существующий мониторинг позволяет контролировать влияние ГМЗ, хвостохранилищ «КБЖ» и «Щ» на водную среду региона [29, 30].

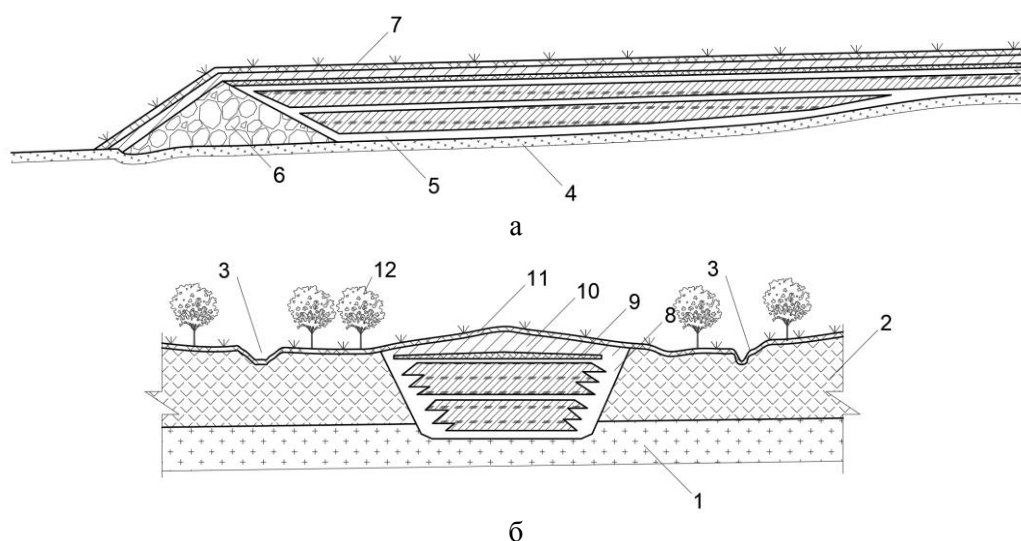


Рис. 5. Схема утилизации твердых отходов горно-металлургического производства в балке (полиэтиленовая мембрана на схеме не показана): а, б – продольное и поперечное сечения: 1 – супесь; 2 – суглинок; 3 – дренажная канава; 4 – основание балки; 5 – антифильтрационный слой из глины; 6 – отвал пустой породы; 7 – сорбционный слой из суглинка мощностью 0,5 м; 8 – гидроизоляция из глины; 9 – биопроницающий дренажный слой щебня; 10 – гидроизоляционный слой суглинка мощностью 1,5 м; 11 – плодородная почва мощностью 0,3 м; 12 – деревья (должна быть вся территория покрыта лесом после нанесения плодородной почвы)

Fig. 5. Diagram of disposal of solid waste from mining and metallurgical production in a ravine (a polyethylene membrane is not shown in the diagram): а, б – longitudinal and cross sections: 1 is sandy loam; 2 is loam; 3 is a drainage ditch; 4 is a ravine base; 5 is an anti-filtration clay layer; 6 is waste rock dump; 7 is a 0.5 m thick loam sorption layer; 8 is clay waterproofing; 9 is a bio-penetrating crushed stone drainage layer; 10 is a waterproofing layer of loam with a thickness of 1.5 m; 11 is fertile soil 0.3 m thick; 12 are trees (the entire area should be covered with forest after the application of fertile soil)

Вместе с тем предлагается расширить сеть мониторинга: создать 4 наблюдательных поста (по 2) на реках Желтая и Зеленая в пределах зон наблюдения; восстановить наблюдательные скважины на территории ГМЗ, восстановить и пробурить дополнительные скважины для уточнения площади загрязнения подземных вод и распространения водоносных горизонтов. Для оценки эффективности водопроницаемого химически активного барьера, перекрывающего продукты выветривания кристаллических пород докембрия, в зоне которых идет значительная часть потока подземных вод, его протяженность должна составлять не менее 100 м, минимальная глубина 6,0 м.

При этом следует иметь в виду, что гипсометрия кровли кристаллических пород, до которой предполагается произвести устройство ВХАБ, может значительно изменяться, поэтому до начала строительных работ с целью уточнения реальных объемов и эффективности перекрытия водоносного горизонта необходимо произвести бурение 11-ти разведочных скважин по линии расположения ВХАБ через каждые 10 м. Глубина скважин составит в среднем 10 м. Общий объем бурения 110 м [31, 32].

Для контроля эффективности работы ВХАБ необходимо соорудить наблюдательную сеть скважин, контролирующую входные и выходные потоки подземных вод, состоящую из трех профилей. Каждый профиль должен состоять из четырех скважин. Общий объем бурения составит 120 м. Для решения экологических задач при хранении хвостов переработки урановых руд авторы считают целесообразным сооружение по технологии «стена в грунте» полуактивных водопроницаемых химически активных барьеров (ВХАБ) и биологических технологий. Это обеспечивает снижение степени загрязненности металлами грунтовых и поверхностных вод, почв и отложений [33, 34].

Сегодня для удаления урана используются различные материалы, такие как активированный уголь, синтетические смолы, цеолиты, материалы биологического происхождения и др. Синтетические сорбционные материалы имеют высокую эффективность удаления неорганических токсикантов, однако их недостатком является высокая стоимость и многоступенчатый синтез. Использование глин в качестве сорбентов перспективное, учитывая различные возможности модификации их поверхности для создания функциональных материалов с новыми улуч-

шенными свойствами. Обработка поверхности глинистых минералов оксидами и гидроксидами железа повышает их адсорбционную способность по отношению к неорганическим токсикантам. При этом полученные сорбенты имеют как анионообменные, так и катионообменные свойства. Поэтому разработка композитов на основе природных глинистых минералов

путем их модифицирования соединениями железа для эффективного извлечения соединений урана и других неорганических токсикантов с загрязненных минерализованных вод является своевременной и актуальной задачей. Для чего авторы рекомендуют исследовать [35, 36]:

- геологическую, гидрологическую, экологическую и социально-демографическую характеристики промышленных площадок, прилегающих к горнодобывающему региону;

- выполнить анализ пространственных и временных характеристик распределений металлов в окружающей среде, пустых породах, хвостах, почвах, грунтовых и поверхностных водах;

- дать оценку рисков для окружающей среды и здоровья людей, подверженных воздействию загрязненных почв, грунтовых и поверхностных вод, а также оценку нейротоксического риска, связанного с марганцем, свинцом и кадмием;

- определить наиболее подходящие площадки в регионе для возможного применения ВХАБ с использованием неорганических наполнителей и бактериальных биореакторов на основе сульфатредуцирующих бактерий при удалении металлов из загрязненных грунтовых вод.

Синтез и исследование методов модификации слоистых силикатов с целью создания на их основе сорбционных материалов широкого назначения в зоне миграции тяжелых металлов и радионуклидов из водных растворов адсорбентами на основе глинистых минералов, размещенных в ВХАБ, рассмотрены в [37, 38].

Результаты внедрения. Предложенная в статье технология и технические средства складирования хвостов при заполнении карт поверхностных хвостохранилищ с добавкой вяжущего использована ГП «УкрНИПИИ-промтехнологии», Украина, в технико-экономическом обосновании строительства предприятия на базе рудных месторождений ГП «Восточный горно-обогатительный комбинат», Украина. Показано, что при подземной добыче руды около 50–55% хвостов обогащения используют для закладки техногенных пустот, а остальную часть, соединенную с вяжу-

щим материалом, складывают в поверхностные хранилища [39, 40].

Перспективные направления исследований.

Результаты химического опробования подземных вод из режимных скважин являлись предметом детального изучения в процессе полевой экспедиции, выполненной ГП «УрНИПИпромтехнологии», Украина, с участием представителей агентства США по защите окружающей среды и специалистов национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского». ВХАБ рекомендует установить в водоносном горизонте кристаллических пород докембрия и продуктов их выветривания на участке, где другие водоносные горизонты, распространенные в этом районе, выклиниваются, а разгрузка подземных вод при этом происходит в водоносный горизонт современных аллювиальных отложений и в реку Желтая, в связи с чем этот участок является наиболее оптимальным для проведения эксперимента [33].

Заключение

На основании результатов исследований, полученных с целью анализа и оценки технологий и технических средств для складирования отходов обогащения руд у поверхностного хвостохранилища с добавкой отвердителя для обеспечения охраны гидрогеологической и окружающей среды, а также населения, проживающего в зоне влияния горных объектов, сделаны следующие выводы:

1. Дана конструкция чаши хранилища, обеспечивающая экологическую и гидрогеологическую безопасность хранения хвостов, которая содержит:

– уплотненный суглинок мощностью 0,5 м, плотностью $1,6 \text{ г/см}^3$, с коэффициентом фильтрации 0,1–0,2 м/сут;

– геомембраны типов HDPE G/G (для дна) и HDPE T/G (для откосов 1,0/2,5);

– защитный слой песка мощностью 0,10 м и нагорные каналы на весь период заполнения хранилища.

2. Установлена возможность использования твердеющих смесей с применением в качестве вяжущего отходов смежного производства и предложен оптимальный состав их ингредиентов на 1 м^3 смеси: хвосты ГМЗ – 1350–1500 кг; вяжущее (цемент) 50–70 кг; вода затворения –

350 л. Прочность массива из твердых отходов из условия безопасности работы техники на его поверхности должна составлять 2–3 МПа для верхнего несущего слоя и 1,0–1,5 МПа для остальных слоев.

3. Предложена технология и технические средства для складирования отходов обогащения руд в поверхностные хвостохранилища с добавкой вяжущего использована ГП «УкрНИПИИ-промтехнологии», Украина, в технико-экономическом обосновании строительства предприятия на базе месторождения ГП «Восточный горно-обогатительный комбинат», Украина. Так, при подземной добыче руды около 50–55% хвостов обогащения используют для закладки техногенных пустот, а остальную часть, соединенную с вяжущим материалом, складывают в поверхностные хранилища.

4. Показано, что при заполнении связанными хвостами всей существующей площади зеркала поверхностного хвостохранилища на высоту ~10 м продолжительность складирования составит более 50 лет. Рекомендовано сооружение водопроницаемого химически активного барьера, перекрывающего продукты выветривания кристаллических пород докембрия, в зоне которых идет значительная часть потока подземных вод. Существующий мониторинг гидрогеологической среды позволяет контролировать влияние поверхностных хвостохранилищ на водную среду региона.

Список литературы

1. Ломоносов Г.Г., Полоник П.И., Абдалах Х. Совершенствование технологии очистных работ на основе применения пастообразных закладочных материалов // Горный журнал. 2000. №2. С. 21–23.
2. Добыча и переработка урановых руд в Украине: монография / под общ. ред. А.П. Чернова. К.: Адеф-Украина, 2001. 238 с.
3. Твердеющие закладочные смеси повышенной плотности/ В.В. Квитка, В.Е. Сергеев, К. Тротер и др. (фирма GMSZ, Австралия) // Горный журнал. 2001. №5. С. 33–35.
4. Антонинова Н.Ю., Шубина Л.А. Использование техногенных отходов ГМК в природоохранных целях на предприятиях ГМК // Экология и промышленность России. 2015. № 10. С. 38–41.
5. Антонинова Н.Ю., Шубина Л.А. Об особенностях комплексного экологического анализа районов, испытывающих локальную техногенную нагрузку предприятий горно-металлургического комплекса // Экология и промышленность России. 2017. Т. 21. № 2. С. 52–56.

6. Антонинова Н.Ю., Шубина Л.А. Возможности экологической реабилитации районов расположения золотвалов // *Экология и промышленность России*. 2019. Т. 23. № 3. С. 49–53.
7. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Закономерности формирования качества подземных вод на отработанных медноколчеданных рудниках Лёвихинского рудного поля (Средний Урал, Россия) // *Геохимия*. 2019. № 3. С. 282–299.
8. Ляшенко В.И., Голик В.И., Дятчин В.З. Складирование хвостов обогащения в виде твердеющих масс в подземном выработанном пространстве и хвостохранилище // *Обогащение руд*. 2020. № 1. С. 41–47.
9. Ляшенко В.И., Голик В.И., Дятчин В.З. Повышение экологической безопасности при снижении техногенной нагрузки в горнодобывающих регионах // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2020. Т. 63. №7. С. 529–538. DOI: 10.17073/0368-0797-2020-6-529-7
10. Экологическая и горнотехническая безопасность разработки месторождений в энергонарушенных горных массивах: проблемы и перспективы / Ляшенко В.И., Воробьев А.Е., Хоменко О.Е., Дудар Т.В. // *Маркшейдерия и Недропользование*. 2021. №3 (113). С. 43–55.
11. Оценка геомеханической и экологической безопасности разработки приповерхностных запасов руд в энергонарушенных массивах комплексными методами / Ляшенко В.И., Воробьев А.Е., Хоменко О.Е., Дудар Т.В. // *Маркшейдерия и Недропользование*. 2021. №5 (115). С. 37–45. <http://geomar-nedra.ru/issues-journal/journal-2021/625-contens-journal-2021-5.html>
12. Lyashenko V., Topolnij F., Dyatchin V. Development of technologies and technical means for storage of waste processing of ore raw materials in the tailings dams. *Technology audit and production reserves*. 2019.49 (3), 33–40. DOI: [http://dx.doi.org/10.15587/2312-8372-2019.49\(3\),33-40](http://dx.doi.org/10.15587/2312-8372-2019.49(3),33-40). <http://journals.uran.ua/tarp/article/view/184940/184920>.
13. Lyashenko, V., Khomenko, O., Topolnij, F., Golik, V. (2020). Development of natural underground ore mining technologies in energy distributed massifs. *Technology Audit And Production Reserves*, Vol. 1, №3(51), 10–17. doi: <http://dx.doi.org/10.15587/2312-8372.2020.195946>.
14. Lyashenko V., Khomenko O., Golik V., Topolny F., Helevera O. (2020). Underground of natural orchnal and resource-saving technology extinguished porozhnin under a digital ore drill. *Technology Audit And Production Reserves*. Vol. 2, №3(52), pp. 9–16. DOI: 10.15587/2312-8372.2020.200022. doi: <http://dx.doi.org/10.15587/2312-8372.2020>.
15. Ляшенко В.И., Пухальский В.Н. Повышение безопасности подземной разработки приповерхностных запасов месторождений сложной структуры // *Безопасность труда в промышленности*. 2016. №2. С. 36–41.
16. Ляшенко В.И., Пухальский В.Н. Обоснование безопасных параметров камер при подземной разработке приповерхностных запасов руд в энергонарушенных массивах // *Маркшейдерия и Недропользование*. 2021. №1 (111). С. 20–32.
17. Антонинова Н.Ю., Собенин А.В., Шубина Л.А. Оценка возможности использования промышленных отходов при формировании геохимических барьеров // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020. № 12. С. 78–88. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-12-0-78-88
18. Крупник Л.А., Шапошник Ю.Н., Шапошник С.Н. Разработка технологии закладочных работ на проектируемом Ново-Ленинском руднике // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015. № 8. С. 25–32.
19. Экологическая безопасность в зоне влияния уранового производства / Ляшенко В.И., Чекушина Т.В., Лисовой И.А., Лисовая Т.С. // *Экология и промышленность России*. 2019. Т. 23. № 3. С. 60–65. DOI: 10.18412/1816-0395-2019-03-60-65.
20. Строительство хвостохранилища на медномolibденовом руднике Лос-Пеламбрес в Чили. URL: <http://mineral.ru/News/34680.html> (дата обращения: 15.12.2021).
21. Clemens S. Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants // *Biochimie*. 2006. Vol. 88. Pp. 1707–1719. 8. Bradl H.B. Adsorption of heavy metal ions on soils and soils constituents // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2004. Vol. 277. Pp. 1–18.
22. Rosenfeld C.E., Chaney R.L., Tappero R.V., Martínez C.E. Microscale investigations of soil heterogeneity: impacts on zinc retention and uptake in zinc-contaminated soils // *Journal of Environmental Quality*. 2017. Vol. 46. No 2. Pp. 373–383.
23. Ляшенко В.И., Голик В.И. Научное и конструкторско-технологическое сопровождение развития уранового производства. Достижения и задачи // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2017. № 7. С. 137–152. DOI: 10.25018/0236-14932017/7/0/137/152.
24. Lyashenko V., Khomenko O., Chekushina T., Topolnij F., Dudar T. (2020). Assessment of environmental and resource/saving technologies and technical means for processing and disposal of man/made formations and waste. *Technology Audit and Production Reserves*, 4/3(54), 21–28. DOI: 10.15587/2312/8372.2020.210666. <http://journals.uran.ua/tarp/article/view/210666/210944>.
25. Rosenfeld C.E., Chaney R.L., Martinez C.E. Soil geochemical factors regulate Cd accumulation by metal hyperaccumulating *Noccaea caerulea* (J. Presl & C. Presl) FK Mey in field-contaminated soils // *Science of the Total Environment*. 2018. Vol. 616. Pp. 279–287.
26. Антонинова Н.Ю., Собенин А.В., Шубина Л.А. Оценка возможности использования промышленных

- отходов при формировании геохимических барьеров // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 12. С. 78–88. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-12-0-78-88.
27. Ляшенко В.И. Природоохранные технологии освоения месторождений полезных ископаемых // Маркшейдерский вестник. 2015. № 1. С.10–15.
 28. Ляшенко В.И. Развитие геомеханического мониторинга свойств и состояния массива горных пород при подземной разработке месторождений сложной структуры // Маркшейдерский вестник. 2016. № 1. С. 35–43.
 29. Nekhunguni P.M., Tavengwa N.T., Tutu H. (2017). Sorption of uranium (VI) onto hydrous ferric oxide-modified zeolite: Assessment of the effect of pH, contact time, temperature, selected cations and anions on sorbent interactions. *Journal of Environmental Management*, 204, 571–582. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.09.034>
 30. Jung H.B., Xu H., Konishi H., Roden E.E. Role of nano-goethite in controlling U(VI) sorption-desorption in sub-surface soil. *Journal of Geochemical Exploration*, 2016, 169, 80–88. doi: <http://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.07.014>
 31. Petlovanyi M., Kuzmenko O., Lozynskyi V., Popovych V., Sai K., & Saik, P. Review of man-made mineral formations accumulation and prospects of their developing in mining industrial regions in Ukraine. *Mining of Mineral Deposits*, 2019, 13(1), 24–38. <https://doi.org/10.33271/mining13.01.024>
 32. Ляшенко В.И., Хоменко О.Е., Голик В.И. Развитие природоохранных и ресурсосберегающих технологий подземной добычи руд в энергонарушенных массивах // Горные науки и технологии. 2020, 5(2), 104–118. DOI: 10.17073/2500/0632/2020/2/104/118
 33. Kovalchuk I., Tobilko V., Kholodko Yu., Zahorodniuk N., Kornilovych B. Purification of mineralized waters from U (VI) compounds using bentonite/iron oxide composites. // *Technology audit and production reserves*. 2020. Т. 3. №. 3 (53). С. 12–18.
 34. Сорбция тяжелых металлов фильтрующими модулями с вермикулит-сунгулитовыми продуктами / Мосендз И.А., Кременецкая И.П., Дрогобужская С.В., Алексеева С.А. // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. 2020. Т. 23. № 2. С. 182–189.
 35. Lyashenko V., Khomenko O., Topolnij F., & Heleviera O. Substantiation of technologies and technical means for disposal of mining and metallurgical waste in mines. *Technology Audit and Production Reserves*, 2020, 3(3(53)), 4–11. DOI:10.15587/2706-5448.2020.200897, <http://dx.doi.org/10.15587/2312-8372.2020>
 36. Lyashenko V., Khomenko O., Chekushina T., Topolnij F. Justification of safe underground development of mountain deposits of complex structure by geophysical methods. *Technology Audit and Production Reserves*, 2020, 5/3(55), 9–18. DOI: 10.15587/2706-5448.2020.215737.
 37. Blyuss B., Semenenko Ye., Medvedieva O., Kyrychko S., & Karatayev A. Parameters determination of hydromechanization technologies for the dumps development as technogenic deposits. *Mining of Mineral Deposits*, 2020, 14(1), 51–61. <https://doi.org/10.33271/mining14.01.051>
 38. Moshynskyi V., Malanchuk Z., Tsymbaliuk V., Malanchuk L., Zhomyruk R., & Vasylichuk O. Research into the process of storage and recycling technogenic phosphogypsum placers. *Mining of Mineral Deposits*, 2020, 14(2), 95–102. <https://doi.org/10.33271/mining14.02.095>
 39. Lyashenko V., Khomenko O., Chekushina T., Dudar T., Topolnij F. Substantiation of efficiency and environmental safety of leaching metals from ore: ways of development and prospects. *Technology Audit and Production Reserves*, 2021, 3/3(59), 19–26. DOI: 10.15587/2706-5448.2021.235288
 40. Механохимическая технология извлечения железа из хвостов обогащения / Голик В.И., Дмитрак Ю.В., Разоренов Ю.И., Масленников С.А., Ляшенко В.И. // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. №4. С. 282–291.

References

1. Lomonosov G.G., Polonik P.I., Abdalakh Kh. Improving the coal extraction technology by applying paste backfill materials. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2000, no. 2, pp. 21–23. (In Russ.)
2. Chernov A.P. *Dobycha i pererabotka uranovykh rud v Ukraine: monografiya* [Mining and processing uranium ores in Ukraine: monograph]. Kyiv: Adef-Ukraine, 2001, 238 p. (In Russ.)
3. Kvitka V.V., Sergeev V.E., Trotter K. et al. Consolidating filling mixtures of high density (GMSZ, Australia). *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2001, no. 5, pp. 33–35. (In Russ.)
4. Antoninova N.Yu., Shubina L.A. The use of man-made waste from the mining and metallurgical complex for environmental purposes at the enterprises of the mining and metallurgical complex. *Ekologiya i promyshlennost Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2015, no. 10, pp. 38–41. (In Russ.)
5. Antoninova N.Yu., Shubina L.A. On the features of a comprehensive ecological analysis of areas experiencing a local man-made load of mining and metallurgical enterprises. *Ekologiya i promyshlennost Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2017, vol. 21, no. 2, pp. 52–56. (In Russ.)
6. Antoninova N.Yu., Shubina L.A. Possibilities of ecological rehabilitation of the ash dump areas. *Ekologiya i promyshlennost Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2019, vol. 23, no. 3, pp. 49–53. (In Russ.)

7. Rybnikova L.S., Rybnikov P.A. Regularities of the formation of groundwater quality in the waste copper pyrite mines of the Levikha ore field (the Middle Urals, Russia). *Geokhimiya* [Geochemistry], 2019, no. 3, pp. 282–299. (In Russ.)
8. Lyashenko V.I., Golik V.I., Dyatchin V.Z. Storage of dressing tailings in the form of solidifying masses in the underground mined-out areas and tailing dump. *Obo-gashchenie rud* [Processing of ores], 2020, no. 1, pp. 41–47. (In Russ.)
9. Lyashenko V.I., Golik V.I., Dyatchin V.Z. Improving environmental safety, while reducing man-made load in mining regions. *Izvestiya vyzov. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy]. 2020, vol. 63, no. 7, pp. 529–538. DOI: 10.17073 / 0368-0797-2020-6-529-7
10. Lyashenko V.I., Vorobiev A.E., Khomenko O.E., Dudar T.V. Environmental and mining safety of developing deposits in energy disturbed mountain massifs: problems and prospects. *Marksheideriya i nedropolzovanie* [Mine Surveying and Subsoil Use], 2021, no. 3 (113), pp. 43–55. (In Russ.)
11. Lyashenko V.I., Vorobiev A.E., Khomenko O.E., Dudar T.V. Assessment of geomechanical and ecological safety of development of near-surface ore reserves in energy disturbed massifs using integral methods. *Marksheideriya i nedropolzovanie* [Mine Surveying and Subsoil Use], 2021, no. 5 (115), pp. 37–45. (In Russ.) Available at: <http://geomar-nedra.ru/issues-journal/journal-2021/625-contens-journal-2021-5.html>
12. Lyashenko V., Topolnij F., Dyatchin V. Development of technologies and technical means for storage of waste processing of ore raw materials in the tailings dams. *Technology Audit and Production Reserves*. 2019, no. 49 (3), pp. 33–40. doi:10.15587/2312-8372.2019.184940. Available at: <http://journals.uran.ua/ tarp/article/view/184940/184920>
13. Lyashenko V., Khomenko O., Topolnij F., Golik V. Development of natural underground ore mining technologies in energy distributed massifs. *Technology Audit and Production Reserves*. 2020, vol. 1, no. 3(51), 10–17. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2020.195946>
14. Lyashenko V., Khomenko O., Golik V., Topolny F., Helevera O. (2020). Substantiation of environmental and resource-saving technologies for void filling under underground ore mining. *Technology Audit and Production Reserves*. 2020, vol. 2, no. 3(52), pp. 9–16. doi: <http://doi.org/10.15587/2312-8372.2020.200022>
15. Lyashenko V.I., Pukhalskiy V.N. Improving safety of underground mining of near-surface reserves of deposits of a complex structure. *Occupational Safety in Industry*, 2016, no. 2, pp. 36–41. (In Russ.)
16. Lyashenko V.I., Pukhalskiy V.N. Rationale for safe parameters of chambers during underground mining of near-surface ore reserves in disturbed massifs. *Marksheideriya i nedropolzovanie* [Mine Surveying and Subsoil Use], 2021, no. 1 (111), pp. 20–32. (In Russ.)
17. Antoninova N.Yu., Sobenin A.V., Shubina L.A. Assessment of the possibility of using industrial waste in the formation of geochemical barriers. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin]. 2020, no. 12, pp. 78–88. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-12-0-78-88.
18. Krupnik L.A., Shaposhnik Yu.N., Shaposhnik S.N. Development of the backfilling technology at the designed Novo-Leninogorsky mine. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2015, no. 8, pp. 25–32. (In Russ.)
19. Lyashenko V.I., Chekushina T.V., Lisovoy I.A., Lisovaya T.S. Environmental safety in the zone of influence of uranium production. *Ekologiya i promyshlennost Rossii* [Ecology and Industry of Russia]. 2019, vol. 23, no. 3, pp. 60–65. DOI: 10.18412/1816-0395-2019-03-60-65.
20. Construction of a tailing dump at the Los Pelambres copper-molybdenum mine in Chile. Available at: <http://mineral.ru/News/34680.html> (Accessed on December 15, 2021).
21. Clemens S. Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants. *Biochimie*. 2006, vol. 88, pp. 1707–1719. 8. Bradl H.B. Adsorption of heavy metal ions on soils and soils constituents. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2004, vol. 277, pp. 1–18.
22. Rosenfeld C.E., Chaney R.L., Tappero R.V., Martínez C.E. Microscale investigations of soil heterogeneity: impacts on zinc retention and uptake in zinc-contaminated soils. *Journal of Environmental Quality*. 2017, vol. 46, no. 2, pp. 373–383.
23. Lyashenko V.I., Golik V.I. Scientific and design-technology support for the development of uranium production. Achievements and objectives. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin]. 2017, no. 7, pp. 137–152. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-7-0-137-152.
24. Lyashenko V., Khomenko O., Chekushina T., Topolnij F., Dudar T. Assessment of environmental and resource-saving technologies and technical means for processing and disposal of man-made formations and waste. *Technology Audit and Production Reserves*. 2020, 4/3(54), 21–28. DOI: 10.15587/2312-8372.2020.210666
25. Rosenfeld C.E., Chaney R.L., Martinez C.E. Soil geochemical factors regulate Cd accumulation by metal hyperaccumulating *Noccaea caerulea* (J. Presl & C. Presl) F.K. Mey in field-contaminated soils. *Science of the Total Environment*. 2018, vol. 616, pp. 279–287.
26. Antoninova N.Yu., Sobenin A.V., Shubina L.A. Assessment of the possibility of using industrial waste in the formation of geochemical barriers. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin]. 2020, no. 12, pp. 78–88. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-12-0-78-88.

27. Lyashenko V.I. Environmental technologies for the development of mineral deposits. *Marksheyderskiy vestnik* [Mine Surveying Bulletin], 2015, no. 1, pp. 10–15. (In Russ.)
28. Lyashenko V.I. Development of geomechanical monitoring of the properties and state of the rock mass in the underground mining of deposits of complex structure. *Marksheyderskiy vestnik* [Mine Surveying Bulletin], 2016, no. 1, pp. 35–43. (In Russ.)
29. Nekhunguni P.M., Tavengwa N.T., Tutu H. Sorption of uranium (VI) onto hydrous ferric oxide-modified zeolite: Assessment of the effect of pH, contact time, temperature, selected cations and anions on sorbent interactions. *Journal of Environmental Management*. 2017, 204, 571–582. doi: <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.09.034>
30. Jung H.B., Xu H., Konishi H., Roden E.E. Role of nano-goethite in controlling U(VI) sorption-desorption in subsurface soil. *Journal of Geochemical Exploration*. 2016, 169, 80–88. doi: <http://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.07.014>
31. Petlovanyi M., Kuzmenko O., Lozynskyi V., Popovych V., Sai K. & Saik P. Review of man-made mineral formations accumulation and prospects of their developing in mining industrial regions in Ukraine. *Mining of Mineral Deposits*, 2019, 13(1), 24–38. <https://doi.org/10.33271/mining13.01.024>
32. Lyashenko V.I., Khomenko O.E., Golik V.I. Development of environmental and resource-saving technologies for underground mining of ores in energy disturbed massifs. *Gornye nauki i tekhnologii* [Mining Science and Technology]. 2020, 5(2), 104–118. DOI: 10.17073/2500/0632/2020/2/104/118.
33. Kovalchuk I., Tobilko V., Kholodko Yu., Zahorodniuk N., Kornilovych B. Purification of mineralized waters from U (VI) compounds using bentonite/iron oxide composites. *Technology Audit and Production Reserves*. 2020, vol. 3, no. 3 (53), pp. 12–18.
34. Mosendz I., Kremenetskaya I., Drogobuzhskaya S., Alekseeva S. Sorption of heavy metals by filter modules with vermiculite-sungulite products. *Vestnik MGTU*. [Vestnik of Murmansk State Technical University], 2020, vol. 23, no. 2, pp. 182–189. (In Russ.)
35. Lyashenko V., Khomenko O., Topolnij F., & Helevera O. Substantiation of technologies and technical means for disposal of mining and metallurgical waste in mines. *Technology Audit and Production Reserves*, 2020, 3(3(53)), 4–11. doi:10.15587/2706-5448.2020.200897, <http://dx.doi.org/10.15587/2312-8372.2020>
36. Lyashenko V., Khomenko O., Chekushina T., Topolnij F. Justification of safe underground development of mountain deposits of complex structure by geophysical methods. *Technology Audit and Production Reserves*. 2020, 5/3(55), 9–18. DOI: 10.15587/2706-5448.2020.215737.
37. Blyuss B., Semenenko Ye., Medvedieva O., Kyrychko S. & Karatayev A. Parameters determination of hydro-mechanization technologies for the dumps development as technogenic deposits. *Mining of Mineral Deposits*, 2020, 14(1), 51–61. <https://doi.org/10.33271/mining14.01.051>
38. Moshynskyi V., Malanchuk Z., Tsymbaliuk V., Malanchuk L., Zhomyruk R. & Vasylychuk O. Research into the process of storage and recycling technogenic phosphogypsum placers. *Mining of Mineral Deposits*, 2020, 14(2), 95–102. <https://doi.org/10.33271/mining14.02.095>
39. Lyashenko V., Khomenko O., Chekushina T., Dudar T., Topolnij F. Substantiation of efficiency and environmental safety of leaching metals from ore: ways of development and prospects. *Technology Audit and Production Reserves*, 2021, 3/3(59), 19–26. DOI: 10.15587/2706-5448.2021.235288
40. Golik V.I., Dmitrak Yu.V., Razorenov Yu.I., Maslennikov S.A., Lyashenko V.I. Mechanochemical technology of iron extraction from concentration tailings. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy], 2021, vol. 64, no. 4, pp. 282–291. (In Russ.)

Поступила 23.11.2021; принята к публикации 16.12.2021; опубликована 25.03.2022
Submitted 23/11/2021; revised 16/12/2021; published 25/03/2022

Ляшенко Василий Иванович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, начальник научно-исследовательского отдела, Украинский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт промышленной технологии, Желтые Воды, Украина.
Email: vilyashenko2017@gmail.com

Воробьев Александр Егорович – доктор технических наук, профессор, проректор по научной деятельности и инновациям, Атырауский университет нефти и газа, Атырау, Республика Казахстан.
Email: fogel_al@mail.ru

Хоменко Олег Евгеньевич – доктор технических наук, профессор кафедры горной инженерии и образования, Национальный технический университет «Днепропетровская политехника», Днепр, Украина.
Email: gudana.in.ua@gmail.com

Дудар Тамара Викторовна – доктор технических наук, старший научный сотрудник, доцент, заведующая кафедрой экологии, Национальный авиационный университет, Киев, Украина.
Email: dudar@nau.edu.ua

Vasiliy I. Lyashenko – PhD (Eng.), Senior Researcher, Head of the Research Department,
State Enterprise Ukrainian Research and Design Institute of Industrial Technology, Zhovti Vody, Ukraine.
Email: vilyashenko2017@gmail.com

Aleksandr E. Vorobev – DrSc (Eng.), Professor, Vice-Rector for Research
and Innovations, Atyrau University of Oil and Gas, Atyrau, Kazakhstan.
Email: fogel_al@mail.ru

Oleg E. Khomenko – DrSc (Eng.), Professor of the Department of Mining Engineering and Education,
National Technical University Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine.
Email: rudana.in.ua@gmail.com

Tamara V. Dudar – DrSc (Eng.), Senior Researcher, Associate Professor,
Head of the Environmental Sciences Department, National Aviation University, Kyiv, Ukraine.
Email: dudar@nau.edu.ua

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

METAL FORMING

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

УДК 669.141.23

DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-1-42-49



ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДАМАССКОЙ СТАЛИ КОВКОЙ МНОГОСЛОЙНЫХ ПАКЕТОВ

Колчин С.А., Горохов Ю.В., Ковалева А.А., Базан Д.А., Божко Д.Н.

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

Аннотация. Дамасская сталь – вид стали с видимыми неоднородностями на поверхности, чаще всего в виде узоров, получаемых различными способами. В статье рассмотрены особенности изготовления дамасской стали методом ковки многослойных пакетов. Данный способ может быть использован для изготовления оружия (клинков, сабель, ножей и т.д.), а также для изготовления инструмента для обработки различных материалов (кожи, пластмассы, древесины). Полученные механической обработкой пластины разных марок стали обезжиривают и чередуя собирают в стопку. Стопку сжимают в приспособлении, конструктивные элементы которого имеют разные коэффициенты линейного расширения. Приспособление со стопкой пластин помещают в печь и получают монолитную заготовку путем диффузионной сварки в безокислительной среде с двумя изотермическими выдержками. Проводят свободную ковку полученной монолитной заготовки. Способ позволяет обеспечить качество сварки и получить цельную заготовку дамасской стали независимо от химического состава стали свариваемых пластин. Целью данной работы является исследование влияния толщины и количества слоев никеля на структуру, твердость и износостойкость дамасской стали в зависимости от содержания в ней никеля и повышение качества изделий путем применения операций термомеханической обработки. Экспериментальными данными подтверждается целесообразность добавления в пакет пластин Ni толщиной 0,3 мм, в качестве одного из критериев которых является больше всего содержание α -твёрдого раствора, что обуславливает их высокие механические свойства. Технический результат, получаемый при осуществлении данного метода изготовления дамасской стали, заключается в надежном обеспечении качества сварки, получении цельной заготовки без внутренних дефектов независимо от химического состава сталей свариваемых пластин. На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что предлагаемое изобретение обладает новизной и изобретательским уровнем.

Ключевые слова: дамасская сталь, механические свойства, ковка, экспериментальные данные, стопка, диффузионная сварка, технический результат.

© Колчин С.А., Горохов Ю.В., Ковалева А.А., Базан Д.А., Божко Д.Н., 2022

Для цитирования

Технология изготовления дамасской стали ковкой многослойных пакетов / Колчин С.А., Горохов Ю.В., Ковалева А.А., Базан Д.А., Божко Д.Н. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №1. С. 42–49. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-1-42-49>



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

DAMASCUS STEEL MANUFACTURING TECHNOLOGY BY FORGING MULTI-LAYER PACKAGES

Kolchin S.A., Gorokhov Yu.V., Kovaleva A.A., Bazan D.A., Bozhko D.N.

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Abstract. Damascus steel is a type of steel with visible inhomogeneities on the surface, most often in the form of patterns produced in various ways. The paper discusses the features of producing Damascus steel by forging multi-layer packages. This method can be used for manufacturing weapons (blades, sabers, knives, etc.), as well as tools for processing various materials (leather, plastic, wood). The plates from different steel grades produced by machining are de-oiled and alternately collected in a pile. The pile is compressed in a tool, whose structural elements have different coefficients of linear expansion. Such tool with a pile of plates is charged in a furnace to produce a monolithic workpiece by diffusion welding in non-oxidizing environment with two isothermal tempering periods. The produced monolithic workpiece undergoes free forging. The method makes it possible to ensure the quality of welding and to produce a solid workpiece of Damascus steel, regardless of the chemical composition of steel of the welded plates. The objective of this paper is to study the influence of thickness and number of nickel layers on the structure, hardness and wear resistance of Damascus steel, depending on the nickel content, and to improve the quality of products by applying thermomechanical processing operations. Experimental data support feasibility of adding 0.3 mm thick Ni plates to the package, whose one of the criteria is the highest content of α -solid solution, contributing to their high mechanical properties. The technical result achieved by using this method of producing Damascus steel is to reliably ensure the quality of welding, produce a solid workpiece without internal defects, regardless of the chemical composition of steels of the welded plates. Based on the foregoing, it can be concluded that the present invention has novelty and an inventive step.

Keywords: Damascus steel, mechanical properties, forging, experimental data, pile, diffusion welding, technical result.

For citation

Kolchin S.A., Gorokhov Yu.V., Kovaleva A.A., Bazan D.A., Bozhko D.N. Damascus Steel Manufacturing Technology by Forging Multi-Layer Packages. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 1, pp. 42–49. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-1-42-49>

Введение

Дамасская сталь – композиционный материал с чередованием слоёв твёрдого высокоуглеродистого и мягкого малоуглеродистого железа. Традиционно её применяют для изготовления режущего инструмента или холодного оружия типа ножей, клинков и т.д. Использование слоистых металлических композиций позволяет не только повысить надёжность и долговечность большой номенклатуры деталей и оборудования, но и существенно сократить расход высоколегированных сталей, дефицитных и дорогостоящих цветных металлов (никель, хром, медь, молибден и др.), снизить энергоёмкость и металлоёмкость, расходы на техническое обслуживание, производство запчастей и ремонт оборудования [1]. Сваривая пакеты стальных пластин с разным содержанием углерода проковкой, кузнецы научились контролировать свойства получаемых изделий [2–6]. Большинство рецептов изготовления кованых изделий из дамасской стали является секретами мастеров, и количе-

ство публикаций по результатам исследований этого древнего процесса металлообработки весьма ограничены, в частности по вопросу влияния на структуру и свойства режущей кромки инструмента слоёв из цветных металлов между стальными пластинами в пакете, подготовленном под ковку.

Целью данной работы является исследование закономерностей пластической деформации при получении дамасской стали в зависимости от содержания в ней никеля и повышения качества изделий путем применения операций термомеханической обработки.

Для достижения цели решены следующие задачи:

- изготовлены ковкой (кузнечной сваркой) образцы из пакетов с различным количеством стальных пластин, со слоями никеля и без него, исследованы структура и свойства;
- проведена сравнительная оценка уровня механических свойств образцов в зависимости от количества слоёв, их состава и степени деформации пакетов.

Методика проведения исследований

Объекты для исследования в данной работе собирают в виде пакетов из пластин сталей марок Ст3, У7 и никеля толщиной 1,4, 3,4 и 0,3 мм, соответственно (рис. 1). Добавление никеля обуславливается тем, что он повышает крепость стали и ее относительную вязкость. Никель задерживает рост зерен стали при нагревании и способствует образованию мелкокристаллической структуры. За счет добавления никеля повышается коррозионная стойкость, также сопротивление действию кислот растет с увеличением содержания никеля, на свариваемость стали он не оказывает заметного влияния. Сборка шести пакетов проводится с помощью электросварки предварительно обезжиренных пластин, как показано на рис. 1, б.

Нагреваются пакеты до температуры 1250–1300°C в кузнечном горне с просеянным коксом фракции 20–30 мм и проковываются на пневматическом молоте с кантовкой на 90°. После протяжки до достижения трёхкратной начальной длины поковка рубится на три равные части (рис. 2) и опять складывается в пакет.

Путём подобных действий набирается шесть пакетов с числом слоёв 100, 300, 900 под окончательную термомеханическую обработку, после которой путем скрутки и протяжки (рис. 3) изготавливается шесть изделий-образцов для исследования эксплуатационных свойств (износостойкость) вырезанных из них ножевых заготовок.



а

б

Рис. 1. Пластины (а) и пакеты, скрепленные сваркой (б), для последующейковки
Fig. 1. Plates (a) and packages fixed by welding (б) for subsequent forging



Рис. 2. Разметка и рубка поковки
Fig. 2. Marking and cutting forgings



Рис. 3. Изготовление изделий-образцов для исследования эксплуатационных свойств
Fig. 3. Manufacturing sample products to study their performance properties

Экспериментальная часть

Металлографические исследования проводились на кованых образцах (рис. 4–6), собранных из отдельных слоёв Ст3, У7 и Ni.

Структура представляет собой ферритно-перлитную смесь, при этом пластины феррита и перлита расположены по очередности и вытянуты

ты в направлении деформации. В феррите углерода практически нет.

Наблюдается некоторая неравномерность по толщине феррита и перлита с поверхности из-за большего воздействия деформации они более тонкие, а внутренние более широкие. Неравномерность видна по полосам, есть непрерывные пластины, а есть прерывные.

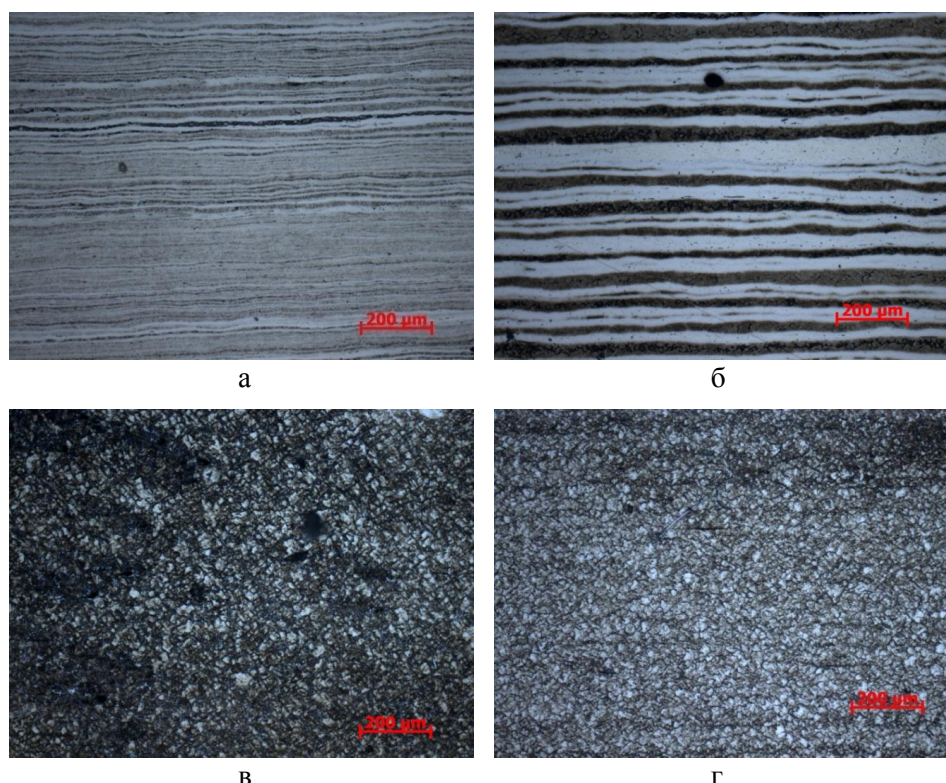


Рис. 4. Микроструктура образцов дамасской стали при увеличении 200 крат 900 слоёв: с пластинами Ni: а – толщина образца 3 мм; б – толщина образца 5 мм; без пластин Ni: в – толщина образца 3 мм; г – толщина образца 5 мм

Fig. 4. Microstructure of the samples of Damascus steel at 200x magnification of 900 layers: with Ni plates: а is a sample, 3 mm thick; б is a sample, 5 mm thick; without Ni plates: в is a sample, 3 mm thick; г is a sample, 5 mm thick

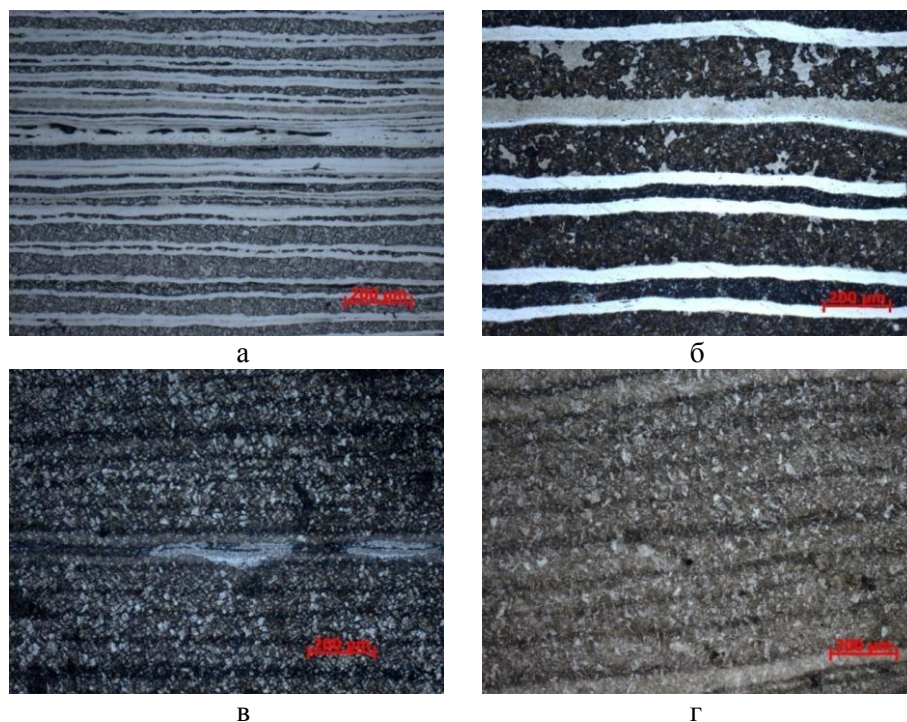


Рис. 5. Микроструктура образцов дамасской стали при увеличении 200 крат 300 слоёв: с пластинами Ni: а – толщина образца 3 мм; б – толщина образца 5 мм; без пластин Ni: в – толщина образца 3 мм; г – толщина образца 5 мм

Fig. 5. Microstructure of the samples of Damascus steel at 200x magnification of 300 layers: with Ni plates: а is a sample, 3 mm thick; б is a sample, 5 mm thick; without Ni plates: в is a sample, 3 mm thick; г is a sample, 5 mm thick

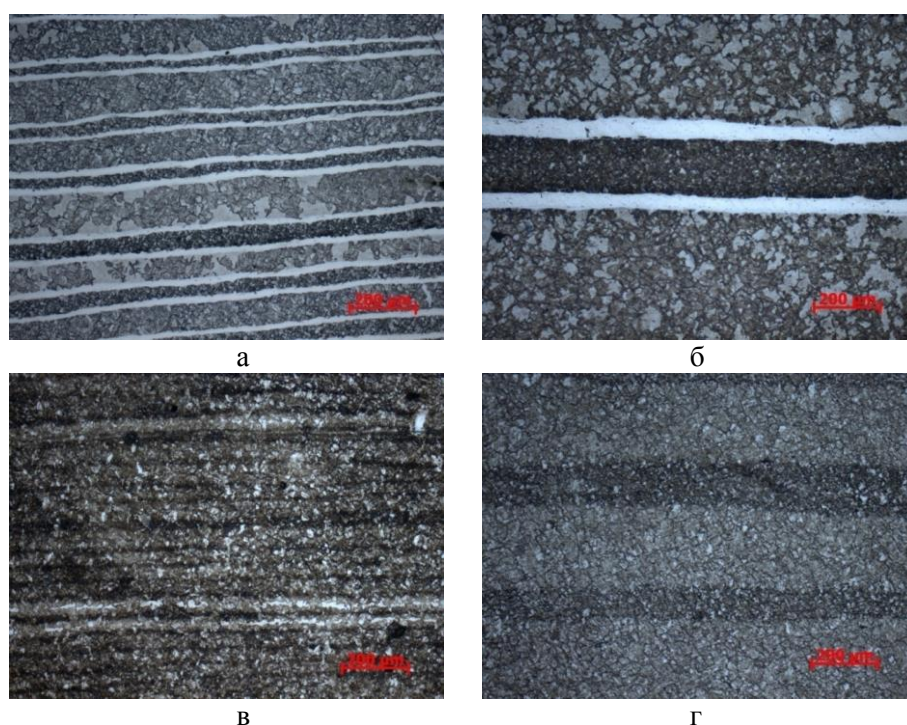


Рис. 6. Микроструктура образцов дамасской стали при увеличении 200 крат 100 слоёв: с пластинами Ni: а – толщина образца 3 мм; б – толщина образца 5 мм; без пластин Ni: в – толщина образца 3 мм; г – толщина образца 5 мм

Fig. 6. Microstructure of the samples of Damascus steel at 200x magnification of 100 layers: with Ni plates: а is a sample, 3 mm thick; б is a sample, 5 mm thick; without Ni plates: в is a sample, 3 mm thick; г is a sample, 5 mm thick

В образцах с добавлением пластин Ni толщиной 0,3 мм больше всего α -твёрдого раствора, что обуславливает их высокие механические свойства.

Исследование дамасских клинков на износостойкость

Образцы ножей (рис. 7) после закалки при $T = 790^\circ\text{C}$ в воду, затачивались универсальной ножеточкой фирмы «Lansky» и испытывались на износостойкость. Результаты приведены в табл. 1.



Рис. 7. Испытание образцов на износостойкость
Fig. 7. Testing the samples for wear resistance

Таблица 1. Испытания на износостойкость образцов
Table 1. Tests for wear resistance of the samples

Количество слоёв	100 с Ni	300 с Ni	900 с Ni	100	300	900
Количество резов	12	28	50	8	15	30

По данным табл. 1 построена диаграмма испытания (рис. 8), из которой видно, что наличие никеля значительно повышает износостойкость образцов.

Анализ рис. 8 показывает ярко выраженную зависимость режущих свойств дамасской стали

от количества слоев и наличия никеля. Испытанию были подвергнуты образцы никелевого и безникелевого дамаса с количеством слоёв 100, 300 и 900 путём резки каната до явного затупления клинка (см. рис. 7).

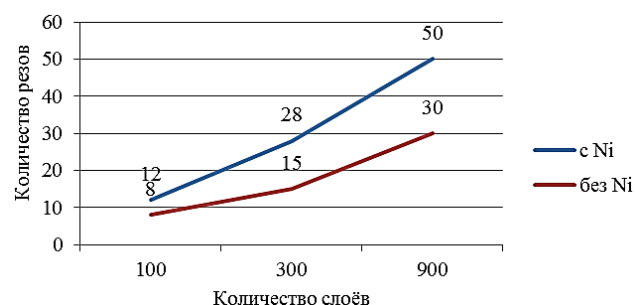


Рис. 8. Испытания на износостойкость
Fig. 8. Wear tests

Твёрдость дамасских ножей для сравнения влияния количества слоёв с Ni и без него измерялась по методу Роквелла (табл. 2).

Таблица 2. Твёрдость дамасских клинков по Роквеллу
Table 2. Rockwell hardness of Damascus blades

Количество слоёв	900 с Ni	300 с Ni	100 с Ni	900 без Ni	300 без Ni	100 без Ni
Твёрдость	55,4	48,1	46,5	62,9	62,4	61,7

После измерения твёрдости образцов без «закалки» в масле и технологического отпуска, выяснилось, что с увеличением количества слоёв без наличия никеля твёрдость повышается.

Рис. 9 показывает, что с увеличением количества слоёв без наличия никеля твёрдость повышается.

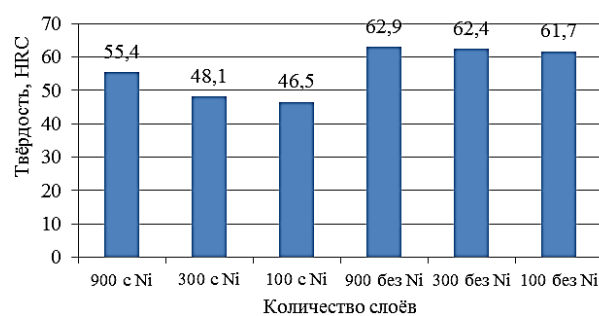


Рис. 9. Гистограмма твёрдости ножей из дамасской стали

Fig. 9. Hardness bar graph of Damascus steel knives

Общий вывод из результатов испытаний – это положительное влияние никеля на износостойкость и большого количества слоёв (в диапазоне до 900) на механические свойства дамасской стали.

Заключение

1. Изготовлены ковкой (кузнечной сваркой) и испытаны образцы с количеством слоёв 100, 300 и 900 с никелем и без него.

2. Установлено, что наилучшие эксплуатационные свойства показали образцы с количеством слоёв 900 толщиной 3 и 5 мм с содержанием никеля.

3. Металлографически установлено, что структура стали вытянутая (текстурованная) и состоит из чередующихся полос феррита и перлита, что, в свою очередь, обуславливает ее высокие механические свойства.

Список литературы

1. Федосов С.А. Исследование сварочной дамасской стали современной выделки // *Металлург*. 2007. №12. С. 64–74.
2. Гуревич Ю.Г. Загадка булатного узора. М.: Знание, 1985. 192 с.
3. Матрюков А.В. Технология металлов. М.: Машгиз, 1952. 494 с.
4. Годеновский Н.Б. Тайна булатной стали. Ростов н/Д.: Феникс, 2010. 383 с.
5. Беляев Н.Т. Булатная сталь. Ч. 1 // *Вестник Института чугуна и стали*. 1978. Вып. 97. № 1. С. 417–439.
6. Пансери К. Дамасская сталь в легенде и реальности // *Гладиус*. 1965. Вып. 4. С. 5–66.
7. Jeffrey Wadsworth and Oleg D. Sherby. Damascus steel-making // *In Science*, vol. 218, no. 4570, pp. 328–329; October 22, 1983.
8. Хорев В.Н. Оружие из дамаска и булата. Ростов н/Д.: Феникс, 2004. 91 с.
9. Юсипов З.И., Ляпунов Н.И. Ручнаяковка: учебник для ПТУ. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1990. 304 с.
10. Константинов И.Л., Сидельников С.Б. Технологияковки: учебник. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2020. 216 с.
11. Углеродные нанотрубки в древней дамасской сабле / Рейболд М., Пауфлер П., Левин А.А. и др. // *Природа*. 2006. Вып. 444 (7117). С. 286.
12. Верховен Дж. Д. Формирование рисунка на мечах и клинках из дамасской стали Wootz // *Индийский журнал истории науки*. 2007. Вып. 42. № 4. С. 559–574.
13. Верховен Дж. Д., Пендрей А. Х., Берге П. М. Исследования лезвий из дамасской стали. Часть II. Разру-

шение и преобразование узора // *Характеристика материалов*. 1993. Вып. 30. № 3. С. 187–200.

14. Фомин А. Стальные узоры дамаска. (06.09.19). Режим доступа: https://rezat.ru/articles/stal_nye_uzory_damaska/

References

1. Fedosov S.A. Studies on modern welded Damascus steel. *Metallurg* [Metallurgist], 2007, no. 12, pp. 64–74. (In Russ.)
2. Gurevich Yu.G. *Zagadka bulatnogo uzora* [The mystery of the damask pattern]. Moscow: Knowledge, 1985, 192 p. (In Russ.)
3. Mastryukov A.V. *Tekhnologiya metallov* [Metal technology]. Moscow: Mashgiz, 1952. 494 p. (In Russ.)
4. Godenovsky N.B. *Taina bulatnoy stali* [The secret of damask steel]. Rostov-on-Don: Phoenix, 2010, 383 p. (In Russ.)
5. Belyaev N. T. Damascus steel. Part 1. *Vestnik Instituta chuguna i stali* [Journal of the Institute of Iron and Steel], 1978, issue 97, no. 1, pp. 417–439. (In Russ.)
6. Panseri C. Damascus steel in legend and reality. *Gladius*, 1965, issue 4, pp. 5–66.
7. Jeffrey Wadsworth, Oleg D. Sherby. Damascus steel-making. *Science*, vol. 218, no. 4570, pp. 328–329; October 22, 1983.
8. Khorev V.N. *Oruzhie iz damaska i bulata* [Weapons from Damascus steel and bulat steel]. Rostov-on-Don: Phoenix, 2004, 91 p. (In Russ.)
9. Yusipov Z.I., Lyapunov N.I. *Ruchnaya kovka: uchebnik dlya PTU* [Hand forging: textbook for vocational schools]. 2nd ed., revised and supplemented. Moscow: Higher School, 1990, 304 p. (In Russ.)
10. Konstantinov I.L., Sidelnikov S.B. *Tekhnologiya kovki: uchebnik* [Forging technology: textbook]. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2020, 216 p. (In Russ.)
11. Reibold M., Paufler P., Levin A.A. et al. Carbon nanotubes in an ancient Damascus sabre. *Nature*, 2006, issue 444 (7117), p. 286.
12. Verhoeven J. D. Pattern formation in Wootz Damascus steel swords and blades. *Indian Journal of History of Science*, 2007, vol. 42, no. 4, pp. 559–574.
13. Verhoeven J. D., Pendray A. H., Berge P. M. Studies of Damascus steel blades: Part II. Destruction and reformation of the pattern. *Materials Characterization*, 1993, vol. 30, no. 3, pp. 187–200.
14. Fomin A. Damascus steel patterns. Available at: https://rezat.ru/articles/stal_nye_uzory_damaska/

Поступила 29.11.2021; принята к публикации 08.02.2022; опубликована 25.03.2022
Submitted 29/11/2021; revised 08/02/2022; published 25/03/2022

Колчин Сергей Анатольевич – ведущий инженер,
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: GEFESTUDIO@mail.ru

Горохов Юрий Васильевич – доктор технических наук, профессор,
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: 16.09.49@list.ru

Ковалева Ангелина Адольфовна – кандидат технических наук, доцент,
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: AKovaleva@sfu-kras.ru, angeli-kovaleva@yandex.ru

Базан Дмитрий Анатольевич – аспирант,
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: dimabazan2424@mail.ru

Божко Дмитрий Николаевич – магистрант,
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: Deamnb@mail.ru

Sergey A. Kolchin – Lead Engineer,
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: GEFESTUDIO@mail.ru

Yury V. Gorokhov – DrSc (Eng.), Professor,
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: 16.09.49@list.ru

Angelina A. Kovaleva – PhD (Eng.), Associate Professor,
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: AKovaleva@sfu-kras.ru, angeli-kovaleva@yandex.ru

Dmitry A. Bazan – postgraduate student,
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: dimabazan2424@mail.ru

Dmitry N. Bozhko – master student,
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: Deamnb@mail.ru

СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

STANDARDIZATION, CERTIFICATION AND QUALITY MANAGEMENT

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

УДК 658.562

DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-1-50-60



ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ НА ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТАХ: ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Наркевич М.Ю., Логунова О.С., Корниенко В.Д., Калитаев А.Н., Суровцов М.М.,
Луганская Д.А., Чернышева А.С.

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

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Предотвращение разрушения и аварийных ситуаций зданий и сооружений на опасных производственных объектах является вызовом для проведения непрерывного мониторинга объектов и разработки критериев оценки их качества. В настоящее время более 75% опасных промышленных объектов вырабатывали свой ресурс, но продолжают эксплуатироваться в рабочем режиме. При этом остаются распространенными традиционные методы и способы проведения осмотра и оценки зданий и сооружений при наличии новых технологий. **Используемые методы.** Авторами в работе предлагается новый инструмент для получения информации о состоянии поверхности ограждающих конструкций зданий и сооружений на промышленном предприятии. Основным инструментом является беспилотный летательный аппарат, который позволяет получить информацию о состоянии объекта в труднодоступных местах. Использование беспилотного летательного аппарата потребовало введения понятия «полезная» площадь обследования, разработки траекторий полета, проведение пилотных испытаний и определения качественных и количественных показателей для оценки состояния поверхности ограждающих конструкций здания. **Новизна.** Алгоритм построения траектории полета беспилотного летательного аппарата отличается от ранее известных наличием «полезной» площади для исследования зданий или сооружений и исключает области, недоступные или неинформативные для наблюдения вследствие наличия растительности, близко расположенных конструктивных элементов, а также конструктивных особенностей ограждающих конструкций. **Результат.** Изучена зависимость удаления квадрокоптера от объекта исследования и «полезной» площади исследования на основе аналитической и экспериментальной информации. **Практическая значимость.** В зависимости от расстояния до наблюдаемой точки эксперт получает информацию о качестве состояния поверхности объекта. Наиболее полно представлена информация для эксперта и дальнейшей автоматизированной обработки только при минимальном расстоянии от точки исследования до камеры беспилотного летательного аппарата. Перспективным направлением развития работы является адаптация методов и методик, описанных в ранее проведенных лабораторных условиях, к полученным изображениям при проведении пилотных экспериментов, к оценке технического состояния зданий и сооружений промышленного предприятия.

Ключевые слова: оценка качества зданий и сооружений, опасный производственный объект, обследование зданий и сооружений, беспилотный летательный аппарат, траектория движения, методика построения траектории, эффект дисперсии.

© Наркевич М.Ю., Логунова О.С., Корниенко В.Д., Калитаев А.Н.,
Суровцов М.М., Луганская Д.А., Чернышева А.С., 2022

Для цитирования

Интеллектуальная система принятия решений при оценке качества зданий и сооружений на опасных производственных объектах: определение траектории движения беспилотного летательного аппарата / Наркевич М.Ю., Логунова О.С., Корниенко В.Д., Калитаев А.Н., Суровцов М.М., Луганская Д.А., Чернышева А.С. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №1. С. 50–60. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-1-50-60>



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

AN INTELLIGENT DECISION SUPPORT SYSTEM FOR ASSESSING THE QUALITY OF BUILDINGS AND STRUCTURES AT HAZARDOUS INDUSTRIAL FACILITIES: DETERMINING THE TRAJECTORY OF THE UNMANNED AIRCRAFT

Narkevich M.Yu., Logunova O.S., Kornienko V.D., Kalitaev A.N., Surovtsov M.M., Luganskaya D.A., Chernysheva A.S.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). Prevention of emergency situations and destruction of buildings and structures at hazardous production facilities is a challenge for continuous monitoring of such facilities and the development of criteria for assessing their quality. Currently, over 75% of hazardous industrial facilities have reached the end of their service life, but continue to be operated in a working mode. At the same time, traditional methods and techniques of inspection and evaluation of buildings and structures remain widespread in the presence of new technologies. **Methods used.** The authors propose a new tool for obtaining information about the condition of the surface of the enclosing structures of buildings and facilities at an industrial enterprise. A main tool is an unmanned aerial vehicle, which allows you to get information about the condition of facilities in hard-to-reach places. The use of such unmanned aerial vehicle required: the introduction of the concept of a "useful" survey area, the development of flight paths, pilot tests and the determination of qualitative and quantitative indicators to assess the condition of the surface of the building's enclosing structures. **Originality.** The algorithm for designing the flight path of the unmanned aerial vehicle differs from the previously known ones because of a "useful" area for the study of buildings or structures and excludes areas inaccessible or uninformative for observation due to vegetation, closely spaced structural elements, as well as design features of enclosing structures. **Result.** The authors have studied how the distance between the quadcopter and the facility under study depend on the "useful" area for the study based on analytical and experimental information. **Practical Relevance.** Depending on the distance to the observed point, an expert receives information about the quality of the surface condition of the facility. The most complete information is provided for the expert and further automated processing only at a minimum distance from the point of study to the camera of the unmanned aerial vehicle. The outlook for the development of the research is to adapt the described methods and techniques used in laboratory conditions to the images obtained during the pilot experiments, to the assessment of a technical condition of buildings and structures of an industrial enterprise.

Keywords: assessment of the quality of buildings and structures, hazardous production facility, inspection of buildings and structures, unmanned aerial vehicle, trajectory, trajectory design technique, distortion effect.

For citation

Narkevich M.Yu., Logunova O.S., Kornienko V.D., Kalitaev A.N., Surovtsov M.M., Luganskaya D.A., Chernysheva A.S. An Intelligent Decision Support System for Assessing the Quality of Buildings and Structures at Hazardous Industrial Facilities: Determining the Trajectory of the Unmanned Aircraft. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 1, pp. 50–60. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-1-50-60>

Введение

Предотвращение разрушения и аварийных ситуаций для зданий и сооружений является вызовом для проведения непрерывного мониторинга объектов и разработки критериев оценки их качества [1, 2]. Особое внимание уделяется способам получения информации о состоянии зданий и сооружений в режиме реального времени и определении динамики развития разрушения и трещинообразования поверхности ограждающих конструкций. В работе [2] авторы на основе ста-

тистических данных доказывают необходимость глобальной модернизации основных фондов опасных производственных объектов, которые выработали свой ресурс, но продолжают эксплуатироваться. Количество таких объектов составляет 75% и более. Эксплуатация таких объектов приводит к обрушению несущих строительных конструкций и, вследствие этого, к человеческим жертвам.

Особую роль в оценке состояния зданий и сооружений играют экспертные организации, работа которых опирается на нормативную базу

и информацию, полученную при обследовании объектов [3]. К информации, полученной при обследовании опасных промышленных объектов, предъявляются требования релевантности, полноты, достоверности и своевременности [4, 5]. Указанные требования определяют необходимость проведения непрерывного мониторинга объектов.

При обследовании зданий и сооружений в последнее десятилетие начали активно применяться новые технологии, основанные на информации, полученной с помощью лазерного сканирования и беспилотных летательных аппаратов [6–9].

В работе [10] выполнена классификация и систематизация нормативных документов, которые лежат в основе экспертной оценки технического состояния зданий и сооружений. Согласно этим документам, оценка состояния зданий и сооружений промышленного предприятия относится к обеспечению промышленной безопасности. Широкое распространение новых информационных технологий в области экспертных оценок, включая промышленную безопасность, делает возможным выполнить проектирование и разработку интеллектуальной системы принятия

решений при оценке состояния зданий и сооружений на опасных производственных объектах.

В ходе предпроектного обследования на основе декомпозиции предметной области выявлены инструменты, средства и методы, которые необходимо использовать при разработке системы. При построении системы принятия решений о состоянии зданий и сооружений промышленного предприятия выделен этап получения графической информации в ходе обследования. В качестве инструмента получения исходной информации рассматривается визуальный осмотр экспертами и с использованием беспилотных летательных аппаратов (рис. 1), а также стационарно расположенных видеокамер [11, 12].

Привлечение практикующих экспертов на этапе разработки пилотного проекта позволяет сформировать базу знаний уникального человеческого опыта.

Привлечение новых средств для сбора информации о состоянии объекта определило четыре основных задачи (рис. 2). Среди этих задач первостепенной является определение траектории движения беспилотного аппарата, которая бы исключала дублирование и потерю информации о состоянии здания и сооружения.

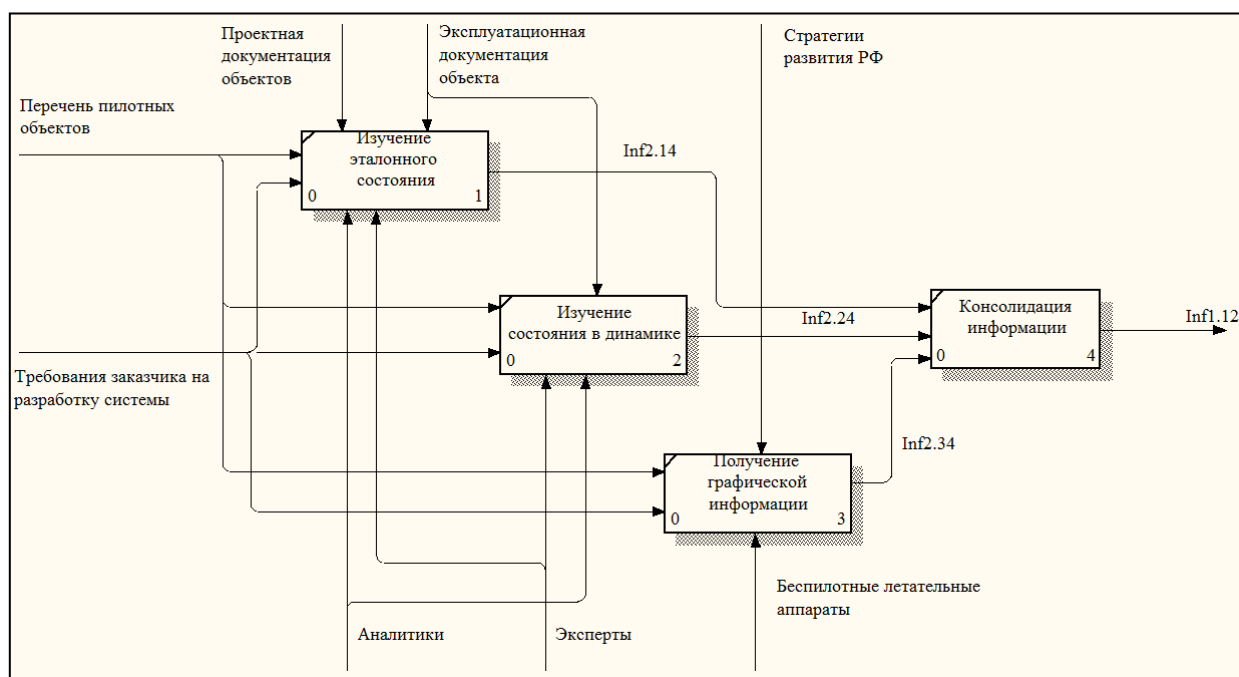


Рис. 1. Диаграмма декомпозиции АЗ для блока «Определение перечня информации»:

Inf2.14 – аналитическая информация об эталонном состоянии объекта на основе проектной документации;

Inf2.24 – экспертная информация о текущем состоянии;

Inf2.34 – информация из видеопотока в динамике по серии исследований

Fig. 1. Decomposition diagram A3 for the block “Determining a list of information”: Inf2.14 is analytical information about a reference state of the facility as per the design documentation; Inf2.24 is expert information about a current state; Inf2.34 is information from a video stream at runtime subject to series of studies

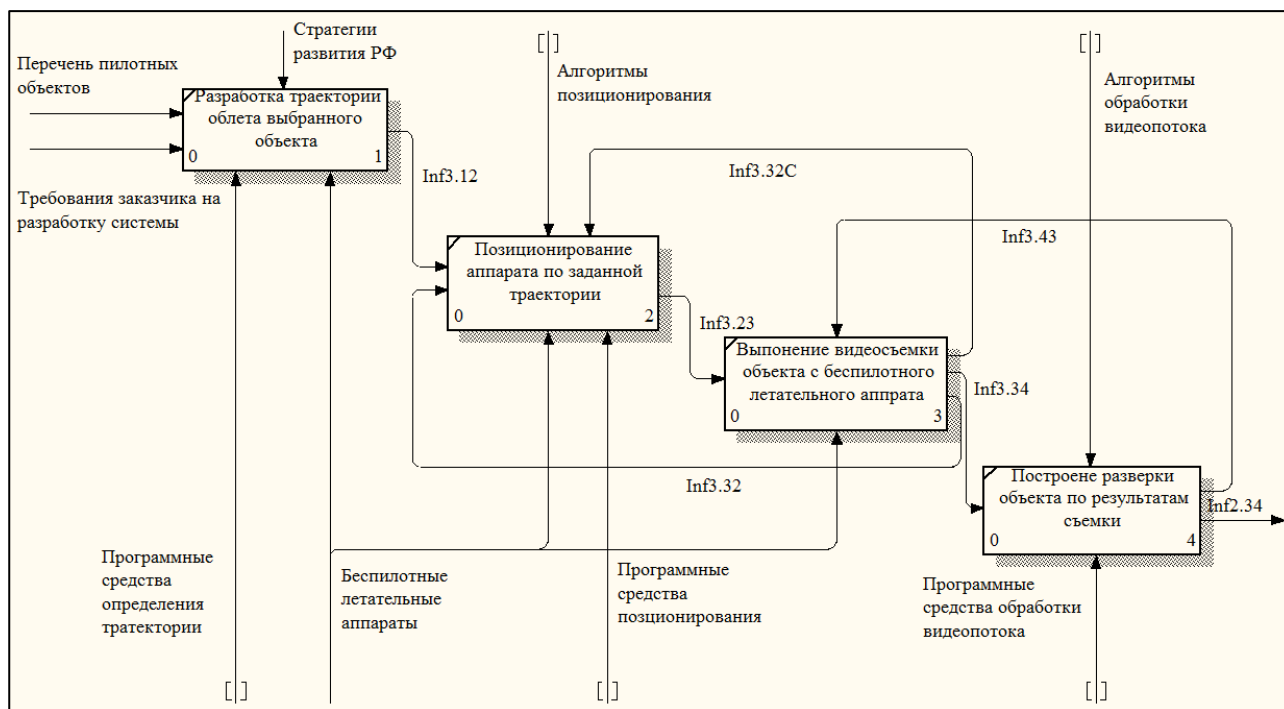


Рис. 2. Диаграмма декомпозиции А4 для блока «Получение графической информации»:

Inf3.12 – математическое описание траектории движения; Inf3.23 – координаты беспилотного летательного аппарата для позиционирования при видеосъемке; Inf3.34 – видеопоток в заданный момент времени; Inf3.32 – уточнение траектории движения; Inf3.32C – указания на управление аппаратом при уточнении траектории; Inf3.43 – требования на выбор кадров из видеопотока

Fig. 2. Decomposition diagram A4 for the block “Receiving graphic information”: Inf3.12 is a mathematical description of the trajectory; Inf3.23 is unmanned aerial vehicle positioning data during video recording; Inf3.34 is a video stream in a set point of time; Inf3.32 is detailing the trajectory; Inf3.32C are references to vehicle control, when detailing the trajectory; Inf3.43 are requirements for selecting frames from the video stream

В рамках приведенного исследования предлагается и обосновывается методика построения движения беспилотного летательного аппарата при обследовании зданий и сооружений на опасных производственных объектах.

Методика построения траектории

1. *Постановка задачи и определение исходных данных.* В ходе выполнения научных исследований определены пилотные объекты для проведения экспертизы по их состоянию. Перечень объектов включает: здание литейного двора доменной печи № 6; главный корпус листопркатного цеха 8 (ЛПЦ-8); здание склада № 54; здание паровоздуховной электростанции (ПВЭС); дымовая труба № 132 ПВЭС; территория ПАО «ММК» – проспект Доменщиков.

На рис. 3 представлен фасад главного корпуса ЛПЦ-8, на котором по результатам визуальной экспертной оценки обнаруживаются:

- разрушение элементов уплотнения швов навесных стеновых панелей: выпадение мастики, разрушение прокладок из упругих материалов;
- наличие трещин всех видов и направлений;
- наличие локальных разрушений поверхности стеновых панелей;

- перемещение объекта или отдельных его элементов в пространстве (угловые и линейные).

На фотографии объекта (см. рис. 3) наблюдаются:

- дисторсия, которая искажает вертикальность боковых граней объекта исследования;
- посторонние объекты в виде растительности, столба освещения, структурных элементов фасада, которые не позволят приблизить летательный аппарат к поверхности изучаемого объекта и при сегментации изображений внесут дополнительный шум;
- наличие фона, окружающего фасад здания.

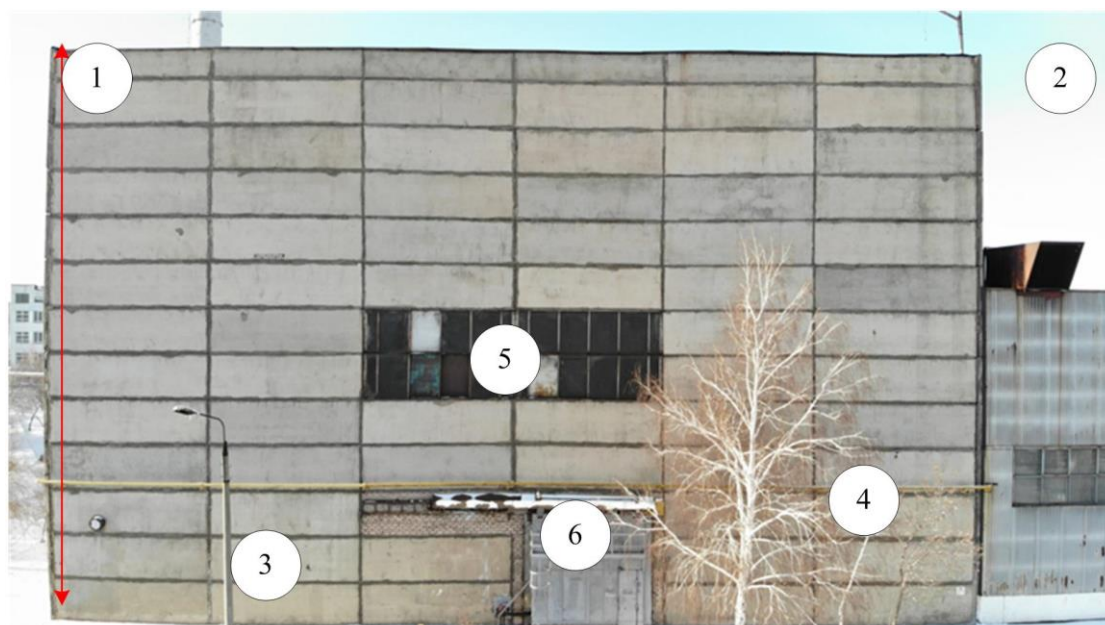


Рис. 3. Общий вид здания ЛПЦ-8: 1 – искажения за счет дисторсии; 2 – окружающий фон; 3 – столб освещения; 4 – растительность; 5, 6 – структурные элементы фасада

Fig. 3. General view of the building of Rolling Shop No. 8: 1 are deformations due to distortion; 2 is surrounding background; 3 is a lighting column; 4 is vegetation; 5, 6 are facade structural elements

Инструментальным средством получения информации о состоянии поверхности зданий и сооружений является беспилотный летательный аппарат DJI Mavic 2 Pro, оснащенный видеокамерой с характеристиками, приведенными в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики видеокамеры беспилотного летательного аппарата
Table 1. Description of a camera in the unmanned aerial vehicle

Характеристика	Значение
Угол раскрытия	77°
Эквивалент формата	35×28 мм
Разрешение	20 Мп на 1 дюйм
Диапазон ISO для видео	100–6400
Диапазон ISO для фото	100–7200

Требованиями к получаемой информации о состоянии зданий и сооружений являются:

1) полнота – отображение фрагментов поверхности зданий и сооружений, исчерпывающее характеризующее нарушения сплошности всей поверхности и ее отдельных частей;

2) воспроизводимость – возможность получения информации о фрагментах поверхности зданий и сооружений с одной геопозиции.

Требование полноты определяют характеристики видеокамеры, установленной на беспилот-

ном летающем аппарате (см. табл. 1). Требование воспроизводимости определяет наличие траектории движения дрона с возможностью логирования и повторения траектории по записанному логу.

2. Математическая модель траектории движения беспилотного летательного аппарата. Для построения воспроизводимой траектории движения беспилотного летательного аппарата при фронтальном обследовании определим модель исследуемого объекта. Пусть поверхность исследуемого объекта образуем прямоугольник с эквивалентным форматом 35 × 28 мм (рис. 4).

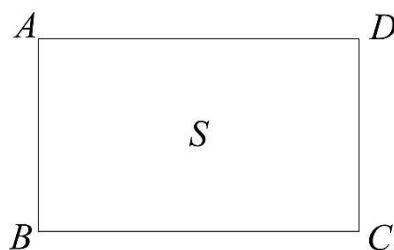


Рис. 4. Геометрическая модель исследуемого объекта
Fig. 4. A geometrical model of the facility under study

Согласно эквиваленту формата получаем

$$\lambda = \frac{35}{28} = \frac{5}{4},$$

где λ – эквивалент формата и, следовательно,

$$\frac{AD}{AB} = \frac{5}{4}.$$

Отрезок AB ограничивает высоту обследования, отрезок AD – ширину, S – захватываемая площадь исследования.

При этом следует понимать, что прямоугольник $ABCD$ может не охватывать всю поверхность объекта, а только его фрагмент.

Точку фиксирования видеокамеры определяют два параметра – величина отрезка AB и угол раскрытия камеры (см. **табл. 1**). Получаем геометрическую модель, приведенную на **рис. 5**.

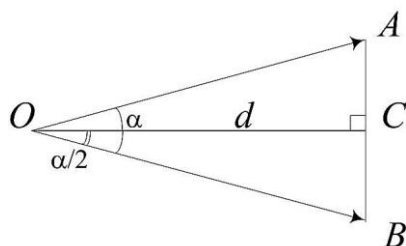


Рис. 5. Геометрическая модель объекта с углом раскрытия
Fig. 5. A geometrical model of the facility with an opening angle

На **рис. 5** введены обозначения: d – расстояние от поверхности объекта до камеры, м; α – угол раскрытия камеры, град; O – точка нахождения беспилотного летательного аппарата.

Учитывая введенные обозначения и соотношения прямоугольного треугольника, получим

$$AB = 2d \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}, AD = \frac{5}{2} d \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}.$$

Учитывая, что угол раскрытия камеры для используемого летательного аппарата составляет 77° , получим коэффициент пропорциональности, равный 0,6615, то есть соотношения примут вид

$$AB = 2 \cdot 0,6615d = 2 \cdot k \cdot d, k = 0,6615;$$

$$AD = \frac{5}{2} \cdot 0,6615d = \frac{5}{2} k \cdot d. \quad (1)$$

Учитывая соотношения (1), легко определяются размеры исследуемой поверхности в зависимости от удаленности беспилотного летательного аппарата (**табл. 2**), приведены примеры определения линейных размеров исследуемого фрагмента.

Результаты расчетов, приведенные в **табл. 2**, показали, что удаленность от объекта исследования на 32 м позволяет охватить высоту в 50 м, что является достаточным для получения изобра-

жения объекта по всей его высоте. Приближение аппарата менее, чем на один метр не является целесообразным, так как фокусное расстояние камеры составляет один метр и расстояние менее 3 м является опасным для нахождения квадрокоптера. Таким образом, диапазон $d \in [3; 32]$ метра для удаления аппарата является достаточным для получения изображения всего объекта по высоте. При этом необходимо определить удаленность, при которой различимы нарушения сплошности на поверхности исследуемого объекта.

Таблица 2. Пример расчета размеров исследуемой области в зависимости от удаленности летательного аппарата от объекта исследования

Table 2. Calculations of sizes of the area under study depending on the distance between the unmanned aerial vehicle and the facility under study (for reference)

d , м	AB , м	AD , м
1	1,59	1,99
2	3,18	3,98
4	6,36	7,95
8	12,73	15,91
16	25,45	31,82
32	50,91	63,63

3. Алгоритм построения траектории движения беспилотного летательного аппарата при обследовании поверхности ограждающих конструкций зданий и сооружений опасного производственного объекта. Рассмотрим фасад здания опасного производственного объекта, поверхность которого образует прямоугольник (см. **рис. 3**). Для обследования объекта необходимо выделить «полезную» площадь обследования, которая может быть доступна для сбора информации с помощью квадрокоптера. На **рис. 3** из рассмотрения должны быть исключены области: 2 – фон; 4 – растительность вокруг здания, которая не позволяет к нему приблизиться. Остальные области могут быть включены в исследование.

Алгоритм построения траектории включает следующие шаги:

- 1) определение «полезной» площади фронтального исследования по изображению полной поверхности объекта, исключая недоступные и неинформативные области;
- 2) выбор точки отсчета и введение системы

координат (рис. 6) согласно размерам области исследования и итерационного исследования в области заданной точки;

3) определение размера масштабной сетки в соответствии с характеристиками видеокамеры, в частности угла раскрытия и эквивалента формата (1);

4) определение «узловых» точек для сбора информации и направления движения беспилотного летательного аппарата.

Особое внимание в этом алгоритме заслуживает п. 3 по определению масштабной сетки. В табл. 3 приведены итерационные шаги ее построения.

Таким образом, вся полезная площадь исследования разбивается масштабной сеткой, которая определена углом раскрытия видеокамеры и высотой здания. Направление полета задается на карте «полезной» площади в виде лога при указании последовательности точек. На рис. 6 пока-

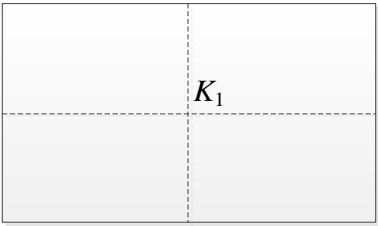
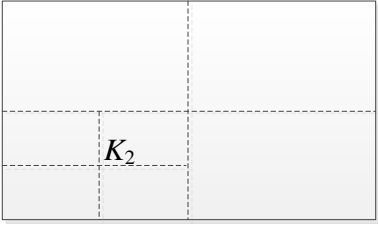
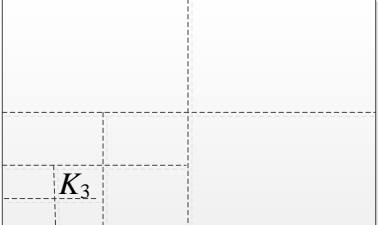

заны две предполагаемые траектории полета с указанием узлов фиксирования информации.

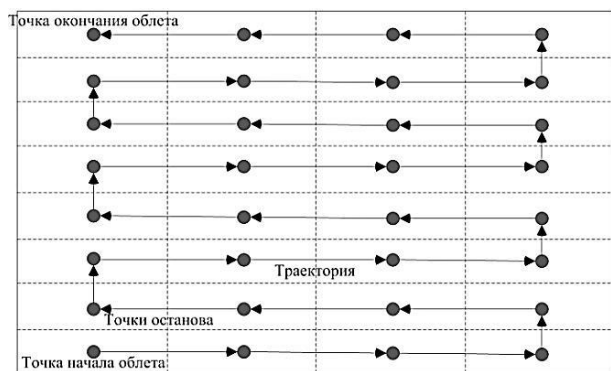
Непрерывная траектория (рис. 6, а) позволяет сформировать видеопоток или фотопоток в разных направлениях (слева направо, справа налево) и вызывает сложности при склеивании развертки полезной площади исследования. Траектория с разрывом требует серийности в траектории и холостого хода беспилотного летательного аппарата (рис. 6, б). Формирование точечной эталонной траектории формируется при первом обследовании здания или сооружения. Каждый из описанных видов траектории опробован при обследовании пилотных объектов.

При использовании непрерывной траектории выявлены проблемы записи и позиционирования аппарата по координате высоты без установки дополнительного модуля.

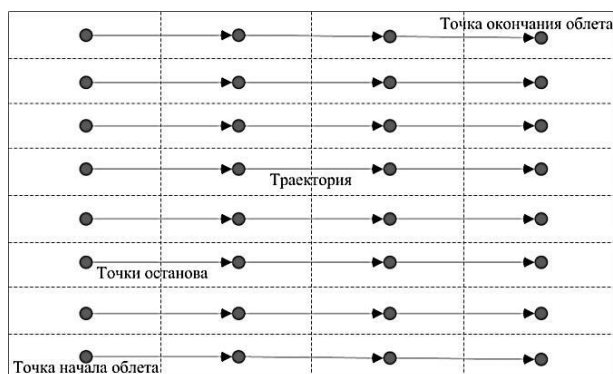
Таблица 3. Перечень итерационных шагов при построении итерационной сетки

Table 3. List of iteration steps, when generating an iteration grid

Номер шага	Вид масштабной сетки	Расстояние до объекта	Координаты узла	Назначение
1		$d_1 = \frac{AB}{2k}$	$K_1 \left(\frac{AB}{2}; \frac{AD}{2} \right)$	Точка получения начального кадра для определения полезной площади исследования
2		$d_2 = \frac{d_1}{2}$	$K_2 \left(\frac{AB}{4}; \frac{AD}{4} \right)$	Сокращение расстояния до объекта в два раза
3		$d_3 = \frac{d_2}{2}$	$K_3 \left(\frac{AB}{8}; \frac{AD}{8} \right)$	Сокращение расстояния до объекта еще в два раза
...
n		$d_n = \frac{d_{n-1}}{2}$	$K_n \left(\frac{AB}{2^n}; \frac{AD}{2^n} \right)$	Доказывается методом математической индукции



a



6

Рис. 6. Примеры траекторий движения беспилотного летательного аппарата по узлам масштабной сетки «полезной» площади обследования:
а – непрерывная траектория; б – траектория с разрывом

Fig. 6. Examples of trajectories of the unmanned aerial vehicle by nodes of the scale grid of the “useful” area under study: a is a continuous trajectory; δ is a broken trajectory

Таблица 4. Характеристики объекта исследования
Table 4. Description of the facility under study

Характеристика	Расстояние до объекта, м			
	5	10	15	20
Высота «полезной» площади*	6,61	13,23	19,84	26,46
Длина «полезной» площади*	8,27	16,54	24,81	33,07
«Полезная» площадь исследования	54,7	218,8	492,2	875,16
Видимость разрушения	Высокая	Средняя	Низкая	Низкая
Возможность экспертной оценки по изображению	Да	Да	Нет	Нет
Возможность количественной оценки по изображению	Да	Нет	Нет	Нет
Видимость других элементов разрушения**	Да	Нет	Нет	Нет
Отделимость трещин и следов ремонтных работ***	Да	Да	Нет	Нет

* Расчет произведен по (1). ** Мелкие трещины на поверхности панели. *** Подтеки раствора при восстановлении расшивки межпанельных швов.

Результаты экспериментального обследования пилотного объекта

В качестве первого пилотного объекта выбрано здание ЛПЦ-8 (**рис. 7**). При его первом обследовании выполнен съем информации с расстояний 5, 10, 15 и 20 м (**рис. 8**) по непрерывной траектории без точек останова (видеопоток) на высоте 12,5 м. Объектом исследования является разрушение элементов уплотнения швов навесных стеновых панелей: выпадение мастики, разрушение прокладок из упругих материалов.

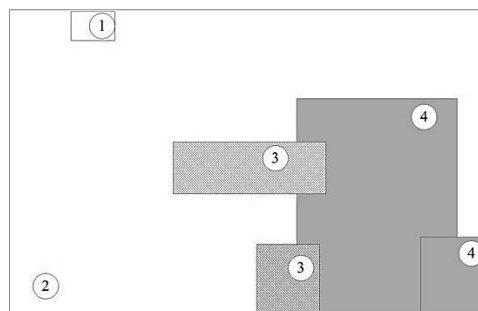


Рис. 7. Схема полезной площади при обследовании здания ЛПЦ-8: 1 – точка обследования дефектов; 2 – «полезная» площадь»; 3 – конструкционные особенности здания; 4 – растительность вокруг здания

Fig. 7. Diagram of the useful area, when inspecting the building of Rolling Shop No. 8: 1 is a point of inspecting the defects; 2 is the useful area; 3 are structural features of the building; 4 is vegetation around the building

В табл. 4 приведены качественные и количественные характеристики объекта в точке исследования для каждого расстояния от здания до камеры беспилотного летательного аппарата.

Заклучение

В результате исследования траектории движения беспилотного летательного аппарата при обследовании и оценке состояния поверхности здания промышленного предприятия выявлено, что:

1) в составе системы принятия решений при оценке технического состояния зданий и сооружений промышленного предприятия одно из первых мест занимает модуль подготовки информации, при получении которой для каждого объекта исследования должна быть построена траектория полета беспилотного летательного аппарата;

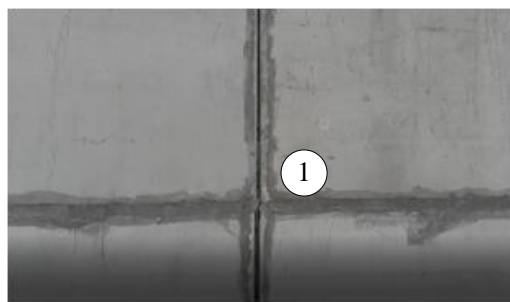
2) траектория полета беспилотного летательного аппарата строится для «полезной» площади здания и исключает области, недоступные или неинформативные для наблюдения: вследствие наличия растительности, близко расположенных конструктивных элементов, а также конструктивных особенностей ограждающих конструкций;

3) в зависимости от расстояния до наблюдаемой точки эксперт получает информацию о качестве состояния поверхности объекта; наиболее полно представлена информация для эксперта и дальнейшей автоматизированной обработки только при минимальном расстоянии от точки исследования до камеры беспилотного летательного аппарата;

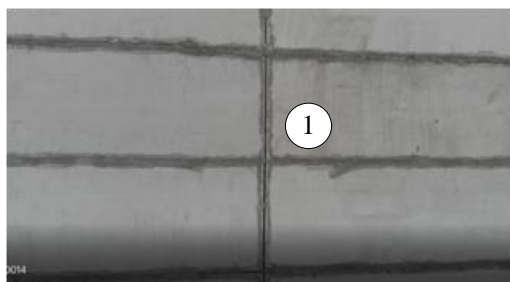
4) перспективным направлением развития работы является адаптация методов и методик, описанных в работах [10, 11], к полученным изображениям при обследовании пилотных объектов, к оценке технического состояния зданий и сооружений промышленного предприятия.

Список литературы

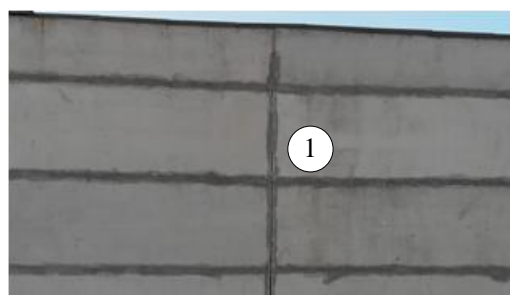
1. Кабальнова О.А., Шишкина Е.А., Зарипова Г.У. Проведение своевременного обследования зданий и сооружений промышленных объектов – мера обеспечения безопасности и предотвращения аварий на производстве // Экспертиза промышленной безопасности и диагностика опасных производственных объектов. 2015. № 4. С. 198–199.
2. Махутов Н.А., Четверик Н.П., Ханухов Х.М. Промышленная безопасность и мониторинг технического состояния зданий и сооружений // Безопасность труда в промышленности. 2008. № 10. С. 64–69.
3. Бардышев О.А., Бардышев А.О. Роль экспертных организаций в обеспечении промышленной безопасности // Вестник МАНЭБ. 2018. Т. 23. № 3. С. 6–10.
4. Логунова О.С. Технология исследования информационных потоков на металлургическом предприятии // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2008. № 3. С. 32–36.



а



б



в



г

Рис. 8. Результаты обследования пилотного объекта с различных расстояний: а – расстояние 5 м; б – расстояние 10 м; в – расстояние 15 м; г – расстояние 20 м

Fig. 8. Inspection of the pilot facility from various distances: а is 5 m; б is 10 m; в is 15 m; г is 20 m

Наиболее полно представлена информация о размере и форме разрушения элементов уплотнения швов навесных стеновых панелей: выпадение мастики, разрушение прокладок из упругих материалов на минимальном расстоянии обследования (5 м).

5. Логунова О.С., Ильина Е.А., Мацко И.И. Информатика. Курс лекций. Магнитогорск, 2014. 124 с.
6. Лазерное сканирование при проведении обследований зданий и сооружений ТЭС / Манеев А.П., Середович А.В., Комиссаров А.В., Иванов А.В. // Электрические станции. 2013. № 9 (986). С. 33–37.
7. Кудасова А.С., Тютин А.Д., Сокольников Э.В. Применение беспилотных летательных аппаратов в строительстве // Инженерный вестник Дона. 2021. №8 (80). С. 31–38.
8. Погорелов В.А. Перспективы применения беспилотных летательных аппаратов в строительстве // Инженерный вестник Дона. 2016. № 1 (40). С. 58.
9. Комбинирование методов наземного лазерного сканирования и аэрофотосъемки с беспилотного летательного аппарата для повышения эффективности контроля промышленного строительства / Гришина А.И., Рамазанов Р.Р., Глухов А.В., Левченко Е.Н. // Вектор ГеоНаук. 2020. Т. 3. № 3. С. 55–67.
10. Анализ эффективности существующей системы оценки качества материалов, изделий и конструкций на опасных производственных объектах / Наркевич М.Ю., Корниенко В.Д., Логунова О.С. и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т. 19. № 2. С. 103–111. DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-3-103-111
11. Логунова О.С., Наркевич М.Ю. Декомпозиция интеллектуальной системы принятия решений при оценке состояния зданий и сооружений промышленного предприятия: сбор информации // Компьютерная интеграция производства и ИПИ-технологии: сб. матер. X Всероссийской конференции, Оренбург, 18–19 ноября 2021 года. Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2021. С. 143–147.
12. Качество материалов, изделий и конструкций в промышленной безопасности: эмпирическая основа / М. Ю. Наркевич, О. С. Логунова, В. Д. Корниенко и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т. 19. № 3. С. 90–101. DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-3-90-101
3. Bardyshev O.A., Bardyshev A.O. The role of expert organizations in ensuring industrial safety. *Vestnik MANEB* [Vestnik of the International Academy of Sciences of Ecology and Health and Safety], 2018, vol. 23, no. 3, pp. 6–10. (In Russ.)
4. Logunova O.S. Technology of research of information flows at a metallurgical enterprise. *Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve* [Information Technologies in Design and Production], 2008, no. 3, pp. 32–36. (In Russ.)
5. Logunova O.S., Ilyina E.A., Matsko I.I. *Informatika. Kurs lektsiy* [Information science. A course of lectures]. Magnitogorsk, 2014, 124 p. (In Russ.)
6. Maneev A.P., Seredovich A.V., Komissarov A.V., Ivanov A.V. Laser scanning during surveys of buildings and structures of thermal power plants. *Elektricheskie stantsii* [Electric Power Plants], 2013, no. 9 (986), pp. 33–37. (In Russ.)
7. Kudasova A.S., Tyutina A.D., Sokolnikova E.V. The use of unmanned aerial vehicles in construction. *Inzhenernyi vestnik Dona* [Engineering Journal of Don], 2021, no. 8 (80), pp. 31–38. (In Russ.)
8. Pogorelov V.A. Prospects for the use of unmanned aerial vehicles in construction. *Inzhenernyi vestnik Dona* [Engineering Journal of Don], 2016, no. 1 (40), p. 58. (In Russ.)
9. Grishina A.I., Ramazanov R.R., Glukhov A.V., Levchenko E.N. Combining methods of ground-based laser scanning and aerial photography from an unmanned aerial vehicle to improve the efficiency of industrial construction control. *Vektor GeoNauk* [Vector of Geosciences], 2020, vol. 3, no. 3, pp. 55–67. (In Russ.)
10. Narkevich M.Yu., Kornienko V.D., Logunova O.S. et al. Analysis of efficiency of the existing system for assessing the quality of materials, products and structures at hazardous production facilities. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2021, vol. 19, no. 2, pp. 103–111. DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-3-103-111
11. Logunova O.S., Narkevich M.Yu. Decomposition of an intelligent decision support system, when assessing the condition of buildings and structures of an industrial enterprise: collecting information. *Kompyuternaya integratsiya proizvodstva i IPI-tehnologii: sb. mater. X Vserossiyskoy konferentsii* [Computer Integration of Production and CALS Technologies: Proceedings of the 10th All-Russian Conference]. Orenburg: Orenburg State University, 2021, pp. 143–147. (In Russ.)
12. Narkevich M.Yu., Logunova O.S., Kornienko V.D. et al. The quality of materials, products and structures in industrial safety: an empirical basis. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2021, vol. 19, no. 3, pp. 90–101. DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-3-90-101

References

1. Kabalnova O.A., Shishkina E.A., Zaripova G.U. Conducting a timely inspection of buildings and structures of industrial facilities is a measure to ensure safety and prevent accidents at work. *Ekspertiza promyshlennoy bezopasnosti i diagnostika opasnykh proizvodstvennykh obektov* [Examination of Industrial Safety and Diagnostics of Hazardous Production Facilities], 2015, no. 4, pp. 198–199. (In Russ.)
2. Makhutov N.A., Chetverik N.P., Khanukhov Kh.M. Industrial safety and monitoring of the technical condition of buildings and structures. *Bezopasnost truda v promyshlennosti* [Occupational Safety in Industry], 2008, no. 10, pp. 64–69. (In Russ.)

Поступила 21.10.2021; принята к публикации 12.01.2022; опубликована 25.03.2022
Submitted 21/10/2021; revised 12/01/2022; published 25/03/2022

Наркевич Михаил Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования зданий и строительных конструкций, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: narkevich_mu@mail.ru. ORCID 0000-0001-6608-8293

Логунова Оксана Сергеевна – доктор технических наук, профессор, директор института строительства, архитектуры и искусства, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: logunova66@mail.ru. ORCID 0000-0002-7006-8639

Корниенко Владимир Дмитриевич – эксперт в области промышленной безопасности по зданиям и сооружениям 1-й категории, ведущий инженер в области экспертизы промышленной безопасности научно-исследовательского института промышленной безопасности, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: volodya.kornienko2319@yandex.ru. ORCID 0000-0002-0637-5765

Калитаев Александр Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники и программирования, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: a.kalitaev@gmail.com. ORCID 0000-0002-5984-967X

Суровцов Максим Михайлович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой управления недвижимостью и инженерных систем, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: surovtsov.maxim@yandex.ru. ORCID 0000-0003-3871-7755

Луганская Дарья Алексеевна – студентка, кафедра бизнес-информатики и информационных технологий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: dluganskaya00@mail.ru

Чернышева Александра Сергеевна – магистрант, кафедра проектирования зданий и строительных конструкций, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: ehridas@mail.ru

Mikhail Yu. Narkevich – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Design of Buildings and Building Structures, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: narkevich_mu@mail.ru. ORCID 0000-0001-6608-8293

Oksana S. Logunova – DrSc (Eng.), Professor, Director of the Institute of Construction, Architecture and Art, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: logunova66@mail.ru. ORCID 0000-0002-7006-8639

Vladimir D. Kornienko – Category 1 Expert in Industrial Safety of Buildings and Structures, Lead Engineer in Industrial Safety Examination of the Research Institute of Industrial Safety, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: volodya.kornienko2319@yandex.ru. ORCID 0000-0002-0637-5765

Alexander N. Kalitaev – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Computer Engineering and Programming, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: a.kalitaev@gmail.com. ORCID 0000-0002-5984-967X

Maksim M. Surovtsov – PhD (Eng.), Head of the Department of Property Management and Engineering Systems, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: surovtsov.maxim@yandex.ru. ORCID 0000-0003-3871-7755

Darya A. Luganskaya – student, Department of Business Informatics and Information Technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: dluganskaya00@mail.ru

Alexandra S. Chernysheva – Master's Student, Department of Design of Buildings and Building Structures, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: ehridas@mail.ru

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

УДК 005.06

DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-1-61-70



ПРИМЕНЕНИЕ НОВЫХ ПОДХОДОВ К ЦИКЛУ ДЕМИНГА

Кунаков Е.П.

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Аннотация. В статье предложены результаты исследований в части совершенствования подходов к планированию, разработке, реализации, контролю параметров процессов менеджмента за счет внедрения новых подходов к циклу Деминга PDCA. Обосновано, что, оставаясь неизменно в рамках цикла Деминга (Plan-Do-Check-Act), при развитии или конкретизации отдельных подэтапов, или стадий цикла Деминга, возможно решить задачу совершенствования процессов и повышения их результативности. В технологических процессах данная задача решена с помощью внедрения предложенного автором нового подхода к циклу Деминга, что находит свое подтверждение в уменьшении времени выполнения технологического процесса и подготовки к нему, сокращения доли брака и последующего исправления продукции. В статье рассмотрена возможность адаптации существующих методов управления проектами для усовершенствования цикла Деминга PDCA и анализа результативности процессов. При этом усовершенствование их базовых принципов может позволить сократить издержки и увеличить отдачу от бизнес-процессов организации. Еще одной отраслью применения предложенного подхода является область подготовки специалистов, так как в современном информационном обществе особую роль играет повышение качества подготовки будущих специалистов. В статье проведен анализ применения методов повышения качества обучения при совместном применении цикла Деминга PDCA и всемирной инициативы и концепции CDIO. По результатам анализа предложена «интегрированная система преподавания», основанная на цикле PDCA и концепции CDIO, которая существенно упростит реализацию принципа постоянного улучшения и совершенствования процессов. В статье показано, что предложенный подход решения задачи управления процессами, оставаясь в рамках цикла Деминга, путем развития или конкретизации отдельных подэтапов, или стадий цикла Деминга, позволяет добиться совершенствования или повышения результативности процессов, на чем основана адаптация известных технических решений, подтвержденных патентами.

Ключевые слова: система менеджмента качества, риски, процессный подход, постоянное улучшение, цикл Деминга PDCA, всемирная инициатива CDIO, стандарты CDIO, образовательный процесс.

© Кунаков Е.П., 2022

Для цитирования

Кунаков Е.П. Применение новых подходов к циклу Деминга // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №1. С. 61–70. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-1-61-70>



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

APPLYING NEW APPROACHES TO THE DEMING CYCLE

Kunakov E.P.

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The paper proposes the results of research in terms of improving approaches to planning, development, implementation, control of management process parameters by introducing new approaches to the PDCA Deming cycle. It is substantiated that, while remaining constantly within the framework of the Deming cycle (Plan-Do-Check-Act), when developing or detailing individual substages, or phases of the Deming cycle, it is possible to improve processes and increase their performance. Regarding the technological processes, the problem is solved by introducing a new approach to the Deming cycle, proposed by the author, which is confirmed by reducing time for performance of the technological process and relevant preparation, reducing a share of defects and the subsequent recovery of products. The paper describes a potential adaptation of the existing methods of project management to improve the Deming cycle PDCA and analyze performance of processes. By improving their basic principles, it is possible to reduce expenses and increase the return of an organization's business processes. Another field for the proposed application of the approach is training of specialists, as in the current information society a special role is attributed to improving the quality of training of future specialists. The paper analyzes the application of methods aimed at increasing the quality of training, while jointly applying the PDCA Deming cycle and the worldwide CDIO initiative and concept. Based on the results of the analysis, an "integrated teaching system" is proposed, following the PDCA cycle and the CDIO concept, which will greatly simplify the application of the principle of continuous improvement of processes. The paper presents that the proposed approach to coping with the task of process control, while remaining within the framework of the Deming cycle, by developing or detailing individual substages, or phases of the Deming cycle, contributes to achieving improvement of, or an increase in efficiency of processes, serving as a basis for adapting known technical solutions, proved by patents.

Keywords: quality management system, risks, process approach, continuous improvement, PDCA Deming cycle, worldwide CDIO initiative, CDIO standards, educational process.

For citation

Kunakov E.P. Applying New Approaches to the Deming Cycle. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 1, pp. 61–70. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-1-61-70>

Введение

Известно, что процессы производства, и, прежде всего, высокотехнологического производства, представляют собой единую интегрированную систему собственно производства и современного управления проектами. При данном подходе производственные процессы являются чрезвычайно сложными и насыщенными информационными потоками. Значительное место занимают инженерно-конструкторская документация, данные контроля технологических процессов и изделий. Новое поколение технологических компонентов системы автоматизированного проектирования обеспечивает оперативное формирование управляющих программ для оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ), отвечающих требованиям высокопроизводительной обработки. При этом обеспечивает непрерывную информационную поддержку изделия в течение всего его жизненного цикла.

Основой электронного определения изделия является электронная модель изделия, включающая все данные о нем с учетом международных стандартов семейства ISO 9000:2015. Цикл Деминга PDCA (Plan-Do-Check-Act) в базовом стандарте ISO 9001:2015 является основополагающим, наряду с процессным подходом. В разделе стандарта, описывающем процессный подход, о его связи с PDCA указано, что все процессы, созданные в рамках процессного подхода, могут быть построены в соответствии с циклом PDCA [1, 2].

Вышеуказанная связь является неизменной основой для обращения к циклу Деминга при решении задач совершенствования процессов. Для решения данной задачи управления и совершенствования процессами может быть предложено, оставаясь в рамках цикла Деминга, развить или усилить роль и значение отдельных подэтапов этого цикла. При этом усовершенствование цикла Деминга PDCA может быть ре-

ализовано за счет применения подходов цифрового управления на стадиях разработки, проектирования, реализации и контроля процессов, выделения стадии «Проектирования» в отдельный подэтап, или стадию, а также совершенствования интерфейсов программного обеспечения современного технологического оборудования.

Применение модернизированного цикла Деминга в управлении технологических процессов

Применение передовых технологий требует программных и аппаратных средств с учетом постоянного импортозамещения программно-технических решений: своевременного технологического оборудования с ЧПУ, встроенных систем контроля, современных координатно-измерительных машин и комплексов, высокоэффективных конструкционных и функциональных материалов технологических решений, технологий и организации высокотехнологического производства и др. [3, 4].

Рассмотрим, насколько предложенный подход решения задачи управления процессами, оставаясь в рамках цикла Деминга, путем развития или конкретизации отдельных подэтапов, или стадий цикла Деминга, реализован в теоретических исследованиях или адаптирован в известных технических решениях, подтвержденных патентами. Такой подход однозначно реализован в патенте CN107123335A «Устройство отображения цикла PDCA и методы отображения». Согласно данному патенту, цикл PDCA представлен в виде 8-ми последовательных подэтапов:

1. Анализ и оценка области улучшения.
2. Постановка улучшенной цели.
3. Выбор и проектирование решений для реализации поставленной цели.
4. Оценка принятого решения.
5. Реализация решения.
6. Проверка, измерение реализованного решения.
7. Улучшение решения.
8. При необходимости, происходит оценка принятых улучшений.

При сопоставлении цикла PDCA и предложенного цикла согласно описанию патента CN107123335A:

- этапу Р «Планирование» соответствуют этапы 1, 2, 3, 4;
- этапу D «Реализация» соответствуют этап 5;
- этапу С «Проверка» соответствуют этапы 7, 8;

- этап А «Улучшение» – удаляется.

В описании данного патента наглядно показано увеличение этапа «Планирование» за счет проектирования и оценки решения. Однако отказ от этапа А «Улучшение» может негативно сказаться как на процессе, так и на самой системе качества.

Таким образом, предложенное решение в данном патенте основано на цикле PDCA и дает преимущества за счет управления необходимыми данными о процессе с помощью внедрения средств цифрового управления и адаптивного управления несоответствиями, благодаря наличию гибкой адаптивной связи, динамическим изменениям приоритетов для технологических процессов, выявленных на стадии управления обратной связи, и применению требований информационной безопасности.

Взятый за основу цикл PDCA [5] позволяет связать управление технологическим процессом и управление информацией о данном технологическом процессе. Данный подход позволяет разработать, внедрить и сертифицировать систему менеджмента на соответствие требованиям стандарта ISO серий 9001 [1, 2].

Рассмотрим далее, насколько применимый в описанном выше решении, подтвержденном патентом, подход решения задачи управления процессами, оставаясь в рамках цикла Деминга, при развитии или конкретизации отдельных подэтапов, или стадий цикла Деминга, может быть реализован в теоретических исследованиях. Покажем, что такой инструмент является основанием повышения эффективности и результативности процесса за счет применения нового подхода к планированию, анализу и последующему улучшению, а также управлению и защите используемой информации о технологическом процессе и продукции. Процессный подход в данной системе предполагает проектирование системы как совокупности взаимосвязанных процессов, при этом для каждого процесса должны обеспечиваться основные характеристики: входы, выходы, наличие ресурсов, потребители каждого из процессов должны быть идентифицированы их требованиям и в ходе деятельности системы должна изучаться их удовлетворенность результатами процесса.

Покажем, что, оставаясь в рамках цикла Деминга (Plan-Do-Check-Act), при развитии или конкретизации отдельных подэтапов, или стадий цикла Деминга, интегрированную систему управления можно представить как совокуп-

ность блока постановки задачи 1, блока формирования требования к решению задачи 2, блока планирования решения задачи 3, блока проектирования процесса 4, блока реализации процесса 5, блока контроля параметров 6, блока улучшения параметров 7. Интегрированная система управления технологическим процессом реализует следующие этапы.

Этап «Планирование» (P-Plan) реализуется блоками постановки задачи 1, формирования требования к решению задачи 2, планирования решения задачи 3, проектирования процесса 4. На этом этапе разрабатываются цели, задачи технологического процесса, необходимые для достижения результатов в соответствии с поставленными требованиями, а также происходит быстрое управление необходимыми ресурсами и адаптивное управление несоответствиями, выявленными на этапе «Улучшение». Также определяются численные параметры элементов технологического процесса, разрабатывается новая конструкторская и технологическая документация на изделие, с помощью компьютеризированных систем составляются планы, схемы и алгоритмы технологического процесса.

Этап «Производство» (D-Do) реализуется блоком реализации процесса 5. На этой стадии реализуется технологический процесс по составленной конструкторской и технологической документации на изделие.

Этап «Проверка» (C-Check) реализуется блоком контроля параметров 6. На этой стадии выполняются действия по контролю показателей технологического процесса и параметров готового изделия.

Этап «Улучшение» (A-Act) реализуется блоком улучшения параметров 7. На этой стадии выполняются действия по постоянному улучшению показателей технологического процесса на основе полученного анализа результативности предыдущего этапа, планирование корректирующих, предупреждающих действий.

Предложенная система была реализована на одном авиастроительном предприятии РФ, в регионе Сибири. На данном предприятии был внедрены компьютеризированные системы на стадии «Планирование», автоматизированные производственные комплексы с программным обеспечением на стадии «Производство» и цифровые контрольно-оптические системы на стадии «Контроль» в технологический процесс изготовления деталей для авиационных изделий.

Согласно предложенному циклу на этапе

«Планирование» (P-Plan) были разработаны цели, задачи технологического процесса, необходимые для достижения результатов в соответствии с поставленными требованиями, а также быстрое управление необходимыми ресурсами и адаптивное управление несоответствиями, выявленными на этапе «Улучшение». В данном блоке была сформирована информация о задаче технологического процесса, а именно усовершенствование за счет изменения технологического процесса гибки труб.

Затем были сформированы требования к решению задачи совершенствования технологического процесса, а именно сокращение времени технологического процесса на 20%, снижение брака готового изделия (трубы) на 30%. Далее были сформированы данные о распределении ресурсов для технологического процесса, так как в ходе проведенного анализа рисков были выявлены риски снижения качества готового изделия, уменьшения производительности, увеличения доли бракованных единиц готового изделия. В результате проведенных действий на данном этапе принято решение модернизации производственного оборудования, а именно замена оборудования, оснастки на новый производственный комплекс, состоящий из автоматизированного трубогибного станка и контрольно-оптической системы. Исходя из принятого решения, произвели переход от эталонного метода гибки труб к цифровому методу, то есть сравнение готового изделия производилось не визуально с эталоном, а с его цифровой моделью.

После определяются численные параметры элементов технологического процесса, разрабатывается новая конструкторская и технологическая документация на изделие, с помощью компьютеризированных систем составляются планы, схемы и алгоритмы технологического процесса. На данном этапе технологического процесса гибки труб произведено проектирование технологического процесса, а именно разработаны новые технологические схемы, технологические инструкции, схемы и чертежи на данный технологический процесс с учетом нового введенного производственного оборудования и новой оснастки.

На этапе «Производство» (D-Do) реализуются этапы технологического процесса получения готового изделия по составленным конструкторской и технологической документации на изделие. На данном этапе выполнены подэтапы получения готового изделия на основе

предложенной интегрированной системы в рамках цикла Деминга, а именно производство гнутых труб согласно технологической документации и заданным характеристикам на новом производственном комплексе, состоящем из автоматизированного трубогибочного станка и контрольно-оптической системы.

На этапе «Проверка» (C-Check) выполняются действия по контролю показателей технологического процесса и параметров готового изделия. На данном этапе контроля параметров готового изделия выполнены подэтапы предложенной интегрированной системы в рамках цикла Деминга, а именно контроль параметров технологического процесса гибки труб, характеристик готового изделия, сопоставление данных характеристик заданным показателям и цифровой моделью готового изделия.

На этапе «Улучшение» (A-Act) выполняются действия по постоянному улучшению показателей технологического процесса на основе полученного анализа результативности предыдущего этапа, планирование корректирующих, предупреждающих действий. В блоке улучшения параметров изделия, оставаясь в рамках цикла Деминга (Plan-Do-Check-Act), выполнен анализ информации о контроле параметров труб из этапа «Проверка» (C-Check). В данном блоке разработаны действия по устранению причин выявленных несоответствий и в результате проведенного анализа предложено изменить разработанную технологическую документацию.

Результаты внедрения интегрированной системы приведены в **табл. 1**.

Таблица 1. Результаты внедрения интегрированной системы

Table 1. Results of the implementation of the integrated system

Параметры заготовки		Характеристики технологического процесса до внедрения интегрированной системы		Характеристики технологического процесса после внедрения интегрированной системы	
Типоразмер	Длина, мм	Время гибки, мин	Брак готового изделия, %	Время гибки, мин	Брак готового изделия, %
6×1	360	6	33,7	0,7	14,7
8×1	1430	20	34,8	1	15,7
12×1	2300	39	30,0	2,4	15,2
18×1	500	17	30,2	1,9	14,6
22×1	1480	13	28,4	2,4	14,7

На основе представленных данных можно сделать вывод, что задача совершенствования технологического процесса, а именно сокращение времени технологического процесса на 20%, снижение брака готового изделия (трубы) на 30% выполнена в полном объеме: сокращение времени технологического процесса в среднем составило 89,5%, снижение брака готового изделия (трубы) в среднем составило 52,1%.

Применение модернизированного цикла Деминга в проектном управлении

Современные IT-компании всё чаще используют проектный подход для осуществления своей деятельности. Для реализации эффективного управления проектами применяются различные методы и подходы. Наиболее популярные и распространенные методы базируются на процессном подходе, что подразумевает прохождение проектом условных этапов цикла Деминга PDCA [6, 7].

Для того чтобы оценить целесообразность применения интегрированного цикла PDCA в части проектного управления, необходимо перенести его уникальные особенности на существующие методы управления проектами и оценить их эффективность. Покажем, что, оставаясь в рамках цикла Деминга (Plan-Do-Check-Act), при развитии или конкретизации отдельных подэтапов, или стадий цикла Деминга, получим основание для совершенствования процесса проектного управления. При этом необходимо понимать, что внедрение ещё одного дополнительного этапа в существующую модель управления проектами может быть затруднительно в виду особенностей самой модели, а также ресурсоёмким по той же причине.

Одним из распространенных методов управления проектами является каскадная модель [6, 7]. Этот метод основан на процессном подходе, однако применить к нему в чистом виде цикл Деминга, вне зависимости от того, классический он или усовершенствованный, не получится. Всё дело в том, что усовершенствованный и классический цикл Деминга подразумевает повторение операций во время прохождения проектом этапов работы, а каскадная модель не является замкнутой, в связи с этим применение к данному методу цикла PDCA и интегрированного цикла PDCA не представляется возможным.

Аналогичные ограничения накладывает специфика V-модели [6, 7], являющейся по своей сути усовершенствованной каскадной моделью,

с разницей лишь в том, что V-модель подразумевает наличие промежуточного контроля после каждого этапа каскада. Данный метод также не является циклическим, поэтому применение интегрированного цикла PDCA в рамках работы над проектом по V-модели также невозможен.

Инкрементная модель [6, 7], в свою очередь, допускает цикличность прохождения проектом этапов его развития. Суть инкрементной модели заключается в том, чтобы с каждым новым циклом наращивать возможности реализуемого в проекте продукта, выпуская с каждым разом усовершенствованную версию самого себя, с добавлением новых возможностей.

После внедрения разрабатываются требования к новым функциональным возможностям продукта, разрабатываемого в рамках проекта, и цикл повторяется снова. Внедрив в инкрементную модель усовершенствованный цикл Деминга, компания увеличит количество шагов в рамках одного цикла. Таким образом, внедрив этап проектирования, можно избежать возможных издержек, связанных с наличием повторных прохождений проектом одних и тех же инкрементов. Спроектировав заранее решения, которые будут реализованы на данном этапе работы проекта, возможно не только сократить время прохождения проектом данного инкремента в виду снижения количества повторов, но и придать разрабатываемой системе логичности и предсказуемости, что также является одним из важных факторов, влияющих на качество конечного продукта.

Ещё одним схожим по своей сути методом является итерационная модель управления проектами [6, 7, 12–14]. Она, как и инкрементная, подразумевает также прохождение различных итераций жизненного цикла проекта. Отличие заключается в том, что при использовании инкрементной модели на каждом прохождении цикла к проекту добавляются новые возможности, расширяется функционал и возможность применения. В случае же с итерационной моделью весь функционал реализуется уже на ранних этапах, а с прохождением каждой итерации этот функционал совершенствуется. При использовании итерационной модели этап проектирования является особенно важным, поскольку каждая следующая версия конечного продукта должна иметь возможность совершенствоваться, а значит, быть гибкой и доступной к изменениям на разных итерациях жизненного цикла проекта.

Кроме того, планирование требований к воз-

можностям системы, обладающей заранее определенной архитектурой, и их реализация в дальнейшем являются более простыми в своем исполнении задачами, поскольку система является спроектированной и подготовленной для дальнейших манипуляций.

Применение усовершенствованного цикла Деминга в рамках итерационной модели позволит сократить затраченные ресурсы на этапах планирования, реализации, а также тестирования и внедрения конечного продукта в бизнес-процессы организации.

Помимо инкрементной и итерационной моделей, широкое распространение получила группа гибких Agile-методологий. Одним из таких методов является SCRUM, нашедший своё применение в проектах, связанных с разработкой программного обеспечения. Метод подразумевает наличие деления проекта на «спринты», по завершении каждого из которых оцениваются результаты, подводятся итоги и выдвигаются требования к следующему «спринту». В рамках каждого «спринта» проект проходит четыре основных этапа: Планирование, Разработка, Тестирование, Демонстрация [6, 7].

После выполнения этих четырех этапов производится оценка результатов «спринта», и на их основании выдвигаются требования к следующему «спринту». Метод входит в семейство гибких методологий, поскольку позволяет корректировать сроки и задачи непосредственно между каждым спринтом. И в случаях, когда необходимо ускорить процесс разработки или решить определенные задачи, поставленные перед проектом, ответственный сотрудник может перераспределить проектные ресурсы для следующего спринта.

В связи с такой непредсказуемостью данный метод имеет существенный изъян – используя SCRUM как модель управления проектом, невозможно составить точную оценку его стоимости и трудозатрат при отсутствии точных сформулированных требований. Кроме того, перераспределение ресурсов уже является незапланированным фактом, что также добавляет сложности к расчетам конечного срока и стоимости разработки проекта [6, 7, 14–16].

Применение усовершенствованного цикла Деминга внутри каждого «спринта» позволит снизить риски возникновения ситуаций, при которых потребуется существенное перераспределение ресурсов в силу того, что каждый «спринт» будет спроектирован заранее. Кроме

того, этап проектирования в рамках одного «спринта» позволит сократить время разработки и тестирования, а значит, даст возможность сэкономить время, выделенное на эти этапы.

Таким образом, оставаясь в рамках цикла Деминга (Plan-Do-Check-Act), при развитии или конкретизации отдельных подэтапов, или стадий цикла Деминга, возможно иметь основание для совершенствования процесса проектного управления. Так, применив интегрированный цикл PDCA к одному из популярных гибких методов, схема работы усовершенствованной методологии SCRUM будет представлять собой следующее. С появлением дополнительного этапа проектирования использование метода SCRUM позволит избежать возможных корректировок ресурсов, что даст проекту динамично развиваться на протяжении всего жизненного цикла, без необходимости регулярных корректирующих действий со стороны ответственного лица.

Определение проектирования как самостоятельного этапа в рамках усовершенствованного цикла Деминга позволяет внести коррективы в существующие методы управления проектами, при этом не изменяя их сути. Это говорит о том, что достижение операционного совершенства возможно в рамках уже изученных и проверенных методологий.

Применение модернизированного цикла Деминга в задаче совершенствования системы образования

В связи с актуальностью проблемы повышения качества инженерного образования в мировом сообществе реализуется крупный международный проект по реформированию инженерного образования (Инициатива CDIO) [8]. Основная идея данного проекта – это такая организация образовательного процесса в вузе, в рамках которого акцентируется внимание на инженерных основах, изложенных в контексте жизненного цикла реальных систем, процессов и продуктов.

Инициатива CDIO декларирует следующие цели: обучение студентов должно быть таким, чтобы выпускники могли продемонстрировать практические знания технических основ профессии; способность создавать и эксплуатировать новые продукты и системы; понимание важности и стратегического значения научно-технического развития общества.

Международный проект CDIO Initiative направлен на установление консенсуса между теорией и практикой в инженерном образовании. Ос-

новой модернизации базового инженерного образования согласно концепции CDIO (Conceive, Design, Implement, Operate) является подготовка выпускников к комплексной инженерной деятельности, связанной с жизненным циклом технических объектов, систем и технологических процессов, которая включает:

1. Изучение потребностей в продуктах инженерной деятельности и возможностей их удовлетворения. Планирование производства продукции – технических объектов, систем и технологических процессов, проектный менеджмент разработки и производства продуктов (Conceive).

2. Проектирование продуктов инженерной деятельности на дисциплинарной и междисциплинарной основе (Design).

3. Производство продуктов инженерной деятельности, в том числе аппаратуры и программного обеспечения, их интеграция, а также проверка, испытание и сертификация продукции (Implement).

4. Применение продуктов инженерной деятельности, управление их жизненным циклом и утилизация (Operate).

Двенадцать Стандартов CDIO определяют философию программ подготовки выпускников к комплексной инженерной деятельности (Стандарт 1), задают требования к формированию учебного плана (Стандарты 2, 3 и 4), образовательной среде и условиям обучения (Стандарты 5 и 6), методам обучения (Стандарты 7 и 8), преподавателям вузов (Стандарты 9 и 10), а также методам оценки результатов обучения студентов и программ в целом (Стандарты 11 и 12) [9].

Использование данных стандартов способствует построению иной структуры образовательного процесса, основанного на принципах постоянной активизации учебной деятельности студентов и ее профессиональной направленности. Идеология CDIO создаёт необходимый контекст профессионального образования, поскольку прописывает общую философию образовательных программ и учебных планов, предусматривает использование активных и интерактивных форм обучения с целью включения студентов в решение практико-ориентированных и профессионально-ориентированных заданий, предполагает развитие у профессорско-преподавательского состава компетенций и умений создавать продукты и системы.

CDIO создаёт необходимый контекст профессионального образования, поскольку прописывает общую философию образовательных программ и учебных планов, предусматривает

использование активных форм обучения с целью включения студентов в решение практико-ориентированных заданий, предполагает развитие у профессорско-преподавательского состава педагогических компетенций и умений создавать продукты и системы, а также аудит и оценку программ и успеваемости студентов [11].

Высокое качество результатов образовательной деятельности, которое определяется уровнем знаний, навыков и компетенций выпускников вуза, может достигаться только при хорошем уровне организации и контроля образовательного процесса.

Для вуза качество – это результат многоступенчатого процесса на уровне вуза, факультетов, институтов и кафедр, процесса, включающего множество дисциплин и участников. Молодой специалист с дипломом о высшем образовании – конечный результат этого многоступенчатого процесса. Качество необходимо на всех уровнях и этапах. Работа над качеством начинается с разработки образовательной программы, четкого понимания существующих возможностей и имеющихся ресурсов.

Любая сфера деятельности вуза представляется в виде совокупности процессов. Для каждого процесса идентифицируются параметры качества ресурсов, входных данных (сырья) и выходных данных (результатов), определяются «поставщики и потребители входа и выхода». Для всех элементов этой типовой схемы устанавливаются метрики качества, фиксируются требования к качеству входных данных, процессов, ресурсов и выходных данных.

К проблемам и трудностям при внедрении концепции CDIO для улучшения образовательной деятельности вуза можно добавить, что внедрение данной концепции в вуз с уже внедренной системой менеджмента качества основано на цикле PDCA: организация согласованности общих целей двух систем, создание или переоформление основных документируемых процедур систем, дополнительное обучение преподавательского состава и ознакомление его с положениями новой системы. При внедрении концепции CDIO также могут возникнуть и другие трудности, которые в совокупности приведут к увеличению времени внедрения данной концепции, усложнению интегрированной системы качества.

Для предотвращения данной ситуации возможно создание общей интегрированной системы образования, основанной на цикле Деминга PDCA и концепции CDIO, так как они имеют сходные по

своей структуре шаги реализации и, самое главное, направлены на повышение качества образования, удовлетворения заинтересованных сторон процесса обучения [12–16]. Покажем, что, сохраняя неизблемым основополагающий цикл Деминга (Plan-Do-Check-Act), при развитии или конкретизации отдельных подэтапов, или стадий цикла Деминга, и одновременном учете 12-ти стандартов концепции CDIO (Conceive, Design, Implement, Operate) получим основание для совершенствования образовательного процесса.

На стадии «Планирование» (P-Plan) происходит разработка целей процесса, необходимых для достижения результатов в соответствии с требованиями потребителей и политикой образовательного учреждения, планирование процессов, видов деятельности и мероприятий, необходимых для достижения результатов в соответствии с ожиданиями и требованиями потребителей и заинтересованных сторон. Данный этап цикла Деминга (Plan-Do-Check-Act) соотносится с 2, 3, 4, 5, 6-м стандартами концепции CDIO (Conceive, Design, Implement, Operate). Также данный этап дополнен учетом рисков (риск-менеджментом), определяются численные параметры элементов системы, структура которой была спроектирована на прошлом этапе, составляются планы, схемы и алгоритмы обучения. На данной стадии по составленным планам происходит построение системы обучения. Производится первичная оценка процесса.

На стадии «Производство» (D-Do) происходит процесс обучения студентов, ведутся научно-исследовательские изыскания и работы, и соотносится с 7, 8, 9, 10-м стандартами концепции CDIO (Conceive, Design, Implement, Operate).

На стадии «Проверка» (C-Check) происходит проверка процесса обучения студентов – тестирование, опросы, экзамены, зачеты, сессии, и соотносится с 11-м, 12-м стандартами концепции CDIO (Conceive, Design, Implement, Operate).

На стадии «Улучшение» (A-Act) происходит выполнение действий по постоянному улучшению показателей процесса планирования на основе полученного анализа результативности предыдущего этапа цикла, планирование корректирующих и предупреждающих действий, актуализация планов, процессов.

При учете рисков изменение системы основано не только на результатах выявленных несоответствий в процессе обучения, но и проблем, которые могут возникнуть в дальнейшей перспективе. При успешном изменении необходимо

использовать полученный опыт для проведения более значительных изменений. Если же изменения оказались негативными, необходимо повторить цикл, но по новому плану.

Создание и реализация «интегрированной системы» обеспечит предпосылки к устранению ряда недостатков в организации образовательного процесса и будет гарантировать вузу высокий уровень качества подготовки специалистов в соответствии с требованиями стандартов и рекомендаций заинтересованных сторон – государства, работодателей и самого будущего специалиста.

Заключение

Благодаря внедрению разработанного нового подхода к циклу Деминга PDCA за счет управления необходимыми данными о процессе с помощью внедрения средств цифрового и адаптивного управления несоответствиями, благодаря наличию гибкой адаптивной связи, динамическим изменениям приоритетов для процессов менеджмента, выявленных на стадии «Управление» обратной связи, и применению требований информационной безопасности, возможно оптимизировать и усовершенствовать как технологические процессы, так и образовательные и иные процессы.

В статье обосновано, что оставаясь неизменно в рамках цикла Деминга (Plan-Do-Check-Act), при развитии или конкретизации отдельных подэтапов, или стадий цикла Деминга, возможно решить как в целом задачу совершенствования процессов и повышения их результативности, так и применительно к случаям: технологического процесса гибки труб, совершенствования процесса проектного управления, в ходе которого определение проектирования как самостоятельного этапа в рамках усовершенствованного цикла Деминга позволило внести коррективы в существующие методы управления проектами, не изменяя их сути, что говорит о достижении операционного совершенства в рамках изученных и проверенных методологий.

И, наконец, предложенная модификация анализа отдельных этапов цикла PDCA при одновременном применении стандартов концепции или всемирной инициативы CDIO (Conceive, Design, Implement, Operate) дало основание для совершенствования образовательного процесса. Таким образом, в статье показано, что предложенный подход решения задачи управления процессами, оставаясь в рамках цикла Деминга, путем развития или конкретизации отдельных подэтапов, или стадий цикла Деминга, позволяет добиться совершенствова-

ния или повышения результативности процессов, на чем и основана адаптация известных технических решений, подтвержденных патентами.

Список литературы

1. ISO 9000:2015. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь.
2. ISO 9001:2015. Системы менеджмента качества. Требования.
3. Совершенствование процесса изготовления сложных изделий с использованием PDM-систем / В.Б. Кузнецова, А.И. Сергеев, А.И. Сердюк, А.В. Попов. Оренбург: ОГУ, 2013. 143 с.
4. Зленко М.А., Нагайцев М.В., Довбыш В.М. Аддитивные технологии в машиностроении: пособие для инженеров. М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. 220 с.
5. Нив Г.Р. Пространство доктора Деминга: пер. с англ. М.: МГИЭТ (ТУ), 1996. 344 с.
6. Орлик С. Программная инженерия. Качество программного обеспечения (Software Quality) / Copyright © Сергей Орлик, 2004–2005.
7. ISO 9241-220. Эргономика взаимодействия человек-система. Часть 220. Процессы обеспечения, выполнения и оценки человеко-ориентированного проектирования в организации.
8. ISO/IWA 2:2007(ru). Системы менеджмента качества. Руководящие указания по применению ISO 9001:2000 в образовании. Quality management systems – Guidelines for the application of ISO 9001:2000 in education. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:iwa:2:ed-2:v1:ru>.
9. Всемирная инициатива CDIO. Планируемые результаты обучения (CDIO Syllabus): информационно-методическое издание / пер. с англ. и ред. А.И. Чучалина, Т.С. Петровской, Е.С. Кулюкиной; Томский политехнический университет. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. 22 с.
10. Стандарты CDIO. Материалы круглого стола «Стандарт современного инженерного образования» проектной сессии АНО «Агентство стратегических инициатив» по продвижению новых проектов», 10 апреля 2014 г. Екатеринбург: ООО «Издательский дом «Ажур», 2014. 32 с.
11. Кондратьев Э.В., Чemezov И.С. Переход российского высшего образования на стандарты CDIO: содержание, перспективы, проблемы // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Экономика и управление. 2015. № 3. С. 41–50.
12. Управление и защита информации как один из способов улучшения деятельности предприятий авиационной промышленности / Кунаков Е.П., Лончих П.А., Лившиц И.И., Лончих Н.П., Дролова Е.Ю. // Качество. Инновации. Образование. №7 (146). 2017. С. 17–26.
13. Livshitz I.I., Kunakov E.P., Lontsikh P.A. Usage of information safety requirements in improving tube bend-

ing process // International Conference on Information Technologies in Business and Industry 2018, ITBI 2018, vol. 1015, Issue 4.

14. Анализ цифровых технологий, применяемых в машиностроительной отрасли / Кунаков Е.П., Лонцих П.А., Коршунова Е.И., Ковригина И.В. // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. №9 (40). С. 42–49.
15. Совершенствование деятельности машиностроительных предприятий на основе применения современных цифровых технологий / Кунаков Е.П., Лонцих П.А., Лившиц И.И., Лонцих Н.П. // Качество. Инновации. Образование. 2018. №5 (156). С. 39–47.
16. Livshitz I.I., Kunakov E.P., Lontsikh P.A. Improvement of the Activities of Machine-Building Enterprises Through the Use of Digital Technologies // Proceedings of the 2018 IEEE International Conference & Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies; IT and QM and IS 2018. С. 233–237.

References

1. GOST R ISO 9000-2015 Quality management systems. Fundamentals and vocabulary.
2. GOST R ISO 9001-2015 Quality management systems. Requirements.
3. Kuznetsova V.B., Sergeev A.I., Serdyuk A.I., Popov A.V. *Sovershenstvovanie protsessa izgotovleniya slozhnykh izdeliy s ispolzovaniem PDM-sistem* [Improving the process of manufacturing complex products using PDM systems]. Orenburg: OSU, 2013, 143 p. (In Russ.)
4. Zlenko M.A., Nagaytsev M.V., Dovbysh V.M. *Additivnye tekhnologii v mashinostroyeni: posobie dlya inzhenerov* [Additive technologies in mechanical engineering: manual for engineers]. Moscow: SSC RF FSUE NAMI, 2015, 220 p. (In Russ.)
5. Neave H.R. The Deming Dimension: Trans. from English. Moscow: MGIIET (TU), 1996, 344 p.
6. Orlik S. Software engineering. Software quality. Copyright © Sergey Orlik, 2004-2005.
7. ISO 9241-220 Ergonomics of human-system interaction. Part 220. Processes for enabling, executing and assessing human-centred design within organizations.
8. ISO/IWA 2:2007(en). Quality management systems. Guidelines for the application of ISO 9001:2000 in edu-

cation. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:iwa:2:ed-2:v1:en>

9. Worldwide CDIO Initiative. Expected learning outcomes (CDIO Syllabus): guidance. Translated from English and edited by Chuchalina A.I., Petrovskaya T.S., Kulyukina E.S. Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University, 2011, 22 p.
10. CDIO standards. Materials of the round table "Standard of modern engineering education" of the project session of ANO Agency for Strategic Initiatives to promote new projects. April 10, 2014. Yekaterinburg: LLC Azhur Publishing House, 2014, 32 p. (In Russ.)
11. Kondratiev E.V., Chemezov I.S. The transition of Russian higher education to CDIO standards: content, prospects, problems. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika i upravlenie* [Bulletin of Voronezh State University. Series: Economics and Management], 2015, no. 3, pp. 41–50. (In Russ.)
12. Kunakov E.P., Lontsikh P.A., Livshits I.I., Lontsikh N.P., Drolova E.Yu. Management and protection of information as one of the ways to improve the activities of aviation industry enterprises. *Kachestvo. Innovatsii. Obrazovanie* [Quality. Innovations. Education.], 2017, no. 7 (146), pp. 17–26. (In Russ.)
13. Livshitz I.I., Kunakov E.P., Lontsikh P.A. Usage of information safety requirements in improving tube bending process. International Conference on Information Technologies in Business and Industry 2018, ITBI 2018, vol. 1015, issue 4.
14. Kunakov E.P., Lontsikh P.A., Korshunova E.I., Kovrigina I.V. Analysis of digital technologies used in the machine-building industry. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Irkutsk State Technical University], 2018, no. 9 (40), pp. 42–49. (In Russ.)
15. Kunakov E.P., Lontsikh P.A., Livshits I.I., Lontsikh N.P. Improving the activities of machine-building enterprises by using modern digital technologies. *Kachestvo. Innovatsii. Obrazovanie* [Quality. Innovations. Education.], 2018, no. 5 (156), pp. 39–47. (In Russ.)
16. Livshitz I.I., Kunakov E.P., Lontsikh P.A. Improvement of the activities of machine-building enterprises through the use of digital technologies. Proceedings of the 2018 IEEE International Conference & Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies; IT and QM and IS 2018, pp. 233–237.

Поступила 03.12.2021; принята к публикации 29.12.2021; опубликована 25.03.2022
Submitted 03/12/2021; revised 29/12/2021; published 25/03/2022

Кунаков Егор Петрович – аспирант кафедры автоматизации и управления, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия.
Email: egor-kunakov@mail.ru

Egor P. Kunakov – postgraduate student of the Department of Automation and Control, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.
Email: egor-kunakov@mail.ru

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ NEW TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT

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

УДК 538.951 : 616.31

DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-1-71-82



ВЛИЯНИЕ БИОИНЕРТНЫХ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНЫХ ПОКРЫТИЙ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ИМПЛАНТ-КОСТЬ

Филяков А.Д., Романов Д.А., Будовских Е.А.

Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Помимо агрессивной внутренней среды организма человека, на долговечность импланта влияет адаптивная перестройка костной ткани, при которой концентрация напряжения локализуется внутри объема импланта возле границы с костной тканью, что приводит к расшатыванию и выходу импланта из строя, несмотря на то, что фактически поверхностный слой импланта остается неповрежденным. Существуют свидетельства, что покрытия с низким модулем Юнга способствуют изменению распределения нагрузок между имплантом и прилегающей костной тканью, снижая тем самым эффект адаптивной перестройки. В настоящее время интенсивно развивается метод электровзрывного напыления покрытий различных систем, в том числе и биоинертных покрытий систем Ti-Zr и Ti-Nb, обладающих низким модулем Юнга. **Используемые методы.** Для оценки влияния биоинертных покрытий систем Ti-Zr и Ti-Nb на распределение напряжений в программе COMSOL Multiphysics® версии 5.5 была разработана двумерная модель. **Новизна.** В настоящей работе впервые было проведено компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния костной ткани, расположенной возле имплантата, с нанесенным на его поверхность электровзрывным покрытием системы Ti-Zr или Ti-Nb. **Результаты.** В результате моделирования установлено, что напряжения распространяются более равномерно по сравнению со случаем без покрытия. Среди исследуемых покрытий наибольший эффект удалось достичь при моделировании системы с промежуточным слоем, выполненным из биоинертного покрытия системы Ti-Zr. **Практическая значимость.** Несмотря на простоту изученных моделей, можно с большой уверенностью судить о пригодности применения электровзрывных биоинертных покрытий в имплантатах.

Ключевые слова: биоинертные покрытия, компьютерное моделирование, электровзрывное напыление, титан, цирконий, ниобий, напряжение.

Работа выполнена в рамках государственного задания 0809-2021-0013.

© Филяков А.Д., Романов Д.А., Будовских Е.А., 2022

Для цитирования

Филяков А.Д., Романов Д.А., Будовских Е.А. Влияние биоинертных электровзрывных покрытий на распределение напряжений на границе раздела имплант-кость // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №1. С. 71–82. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-1-71-82>



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

THE EFFECT OF BIOINERT ELECTROEXPLOSIVE COATINGS ON STRESS DISTRIBUTION NEAR THE DENTAL IMPLANT–BONE INTERFACE

Filyakov A.D., Romanov D.A., Budovskikh E.A.

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). In addition to the aggressive internal human body environment, an implant's useful life is influenced by bone tissue stress shielding, when the stress concentration is localized in the implant volume near the bone interface. It leads to bone loosening and implant failure; however, the implant surface layer isn't affected. Some studies show that coatings with low Young's modulus change force distribution between the implant and adjacent bone tissue, decreasing the effect of stress shielding. An electroexplosive method, intensively developing nowadays, is used for spraying various coatings, including Ti-Zr и Ti-Nb bioinert coatings with low Young's modulus. **Methods Applied.** The 2D models were developed in COMSOL Multiphysics® 5.5 to evaluate the effect of Ti-Zr and Ti-Nb bioinert coatings on the stress distribution. **Originality.** In the present work, for the first time, we have carried out a computer modelling of the stress-strain state of bone tissue located near the implant with an electro-explosive Ti-Zr or Ti-Nb coating. **Results.** The modeling has shown that the stresses are distributed more uniformly as compared to an uncoated model. The most significant effect among the coatings under study was achieved in modelling the system with an intermediate layer from a Ti-Zr bioinert coating. **Practical Relevance.** Despite the simplicity of the studied models, it is possible to conclude with high confidence that electroexplosive bioinert coatings can be applied in implants.

Keywords: bioinert coating, computer modelling, electroexplosive spraying, titanium, zirconium, niobium, stress.

The research was conducted as part of State Order No. 0809-2021-0013.

For citation

Filyakov A.D., Romanov D.A., Budovskikh E.A. The Effect of Bioinert Electroexplosive Coatings on Stress Distribution near the Dental Implant–Bone Interface. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 1, pp. 71–82. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-1-71-82>

Введение

В настоящее время большая часть имплантационных устройств, существующих на рынке медицинского оборудования, изготавливается из α - β -титанового сплава Ti6Al4V, также известного за рубежом как Grade 5 и Ti64 [1, 2]. Значительным недостатком данного сплава является присутствие в его химическом составе алюминия и ванадия. Выход ионов данных металлов с поверхности импланта под действием коррозии в ходе эксплуатации способствует развитию патологических проблем со здоровьем. Многочисленные исследования демонстрируют канцерогенность и цитотоксичность рассматриваемых металлов [3, 4]. Так, чрезмерное воздействие алюминия увеличивает риск развития рака молочной железы [5] и неврологических состояний, таких как болезнь Альцгеймера [6]. Оральное или ингаляционное поступление ванадия и его

соединений в организм неблагоприятно воздействует на дыхательную и нервную систему, кровь, печень и другие органы, а также повышает риск образования злокачественных опухолей [7, 8]. Решением данной проблемы могут служить биоинертные покрытия систем Ti-Zr и Ti-Nb. Многочисленные исследования *in vivo* и *in vitro* показывают высокую безопасность, коррозионную стойкость и биосовместимость титановых сплавов, содержащих ниобий и цирконий [9, 10]. Так, в работе [11] под руководством J. Уреña была продемонстрирована биосовместимость ниобиевых покрытий, нанесенных различными методами. При испытаниях *in vitro* для всех поверхностей с покрытием Ti-Nb была достигнута положительная жизнеспособность остеобластоподобных клеток (MG-63). В работе [12] было показано, что бинарные системы сплавов системы Ti-Zr с различными концентрациями Zr (5, 10 и 15 мас.%) имеют лучшие показатели электро-

химического поведения в среде, имитирующей свойства биологических жидкостей.

Другим недостатком сплава Ti6Al4V является высокое значение модуля Юнга, достигающее 110 ГПа [13, 14]. Данное значение намного выше показателей, демонстрируемых костью. Так, для кортикальной ткани рассматриваемый параметр равен 10–30 ГПа, а для губчатой – 0,01–2 ГПа [15, 16]. Различие значений модуля Юнга способствует неравномерному распределению нагрузок между имплантационным устройством и костью, приводящему, согласно закону Вольффа, к адаптивной перестройке костных тканей вокруг имплантата, что в конечном счете увеличивает риск выхода импланта из строя [17].

В работе [18] продемонстрировано, что покрытия Ti-Zr, нанесенные методом ионно-плазменного напыления толщиной 5 мкм, содержащие Zr 11 и 22 мас.%, имеют значения модуля Юнга, равные 77–98 ГПа, в то время как титановая подложка – 110 ГПа. В работе [19] демонстрируется схожая ситуация. Значения модуля Юнга покрытия системы Ti-Nb изменяются в пределах от 53 до 64 ГПа.

Помимо агрессивной внутренней среды организма человека, на долговечность импланта влияет адаптивная перестройка костной ткани, при которой концентрация напряжения локализуется внутри объема импланта возле границы с костной тканью, что приводит к ослаблению кости, расшатыванию и выходу импланта из строя, несмотря на то, что фактически поверхностный слой импланта остается неповрежденным.

Существуют свидетельства, что покрытия с низким модулем Юнга способствуют изменению распределения нагрузок между имплантом и прилегающей костной тканью. В статье [20] демонстрируется, что нанесенное на дентальный имплант биоинертное покрытие Poiyactive® при нагрузке, приложенной по вертикальной оси, уменьшает сжимающее радиальное напряжение на границе между костью и имплантатом вокруг шейки имплантата в 6,6 раза и растягивающее радиальное напряжение в 3,6 раза.

В настоящее время интенсивно развивается метод электровзрывного напыления покрытий различных систем [21, 22], в том числе и биоинертных покрытий систем Ti-Zr и Ti-Nb. При изуче-

нии покрытий систем Ti-Zr, Ti-Nb [23] было обнаружено, что они демонстрируют меньший модуль Юнга по сравнению с подложкой, выполненной из сплава BT6 или коммерчески чистого титана (BT1-0), на которую они были нанесены.

В связи с этим данное исследование является актуальным. Одним из наиболее эффективных и информативных методов исследования проблем, связанных с биомеханикой, является компьютерное моделирование методом конечных элементов. Он позволяет избежать проблем, связанных с использованием аналитических методов, а также получить более точные результаты [24, 25].

Целью данной работы является определение и анализ напряженно-деформированного состояния электровзрывных биоинертных покрытий систем Ti-Zr и Ti-Nb при их эксплуатации в человеческом теле.

Материалы и методы

В качестве подложки, на которую производилось электровзрывное напыление биоинертных покрытий систем Ti-Zr и Ti-Nb, использовался зубной имплантат, выполненный из титанового сплава Ti-6Al-4V (BT6). Формирование поверхностного слоя производилось на электровзрывной установке ЭВУ 60/10М посредством электрического взрыва ниобиевой или циркониевой фольги при поглощаемой плотности мощности 2,0 ГВт/м². Масса как циркониевой, так и ниобиевой фольги составляла 850 мг.

Структуру и морфологию полученного покрытия и прилегающего слоя подложки (рис. 1) анализировали методами сканирующей электронной микроскопии (прибор Carl Zeiss EVO50).

Толщина полученного электровзрывного покрытия определялась на поперечных шлифах с помощью программного обеспечения Leica Application Suite. При указанных параметрах толщина покрытия составляла ≈ 63 мкм. Модуль Юнга определялся путем наноиндентирования покрытия при нагрузке 50 мН (NAN-твердомер NHT-S-AX-000X).

Для оценки влияния биоинертных покрытий систем Ti-Zr и Ti-Nb механического поведения в программе COMSOL Multiphysics® версии 5.5 была разработана двумерная модель.

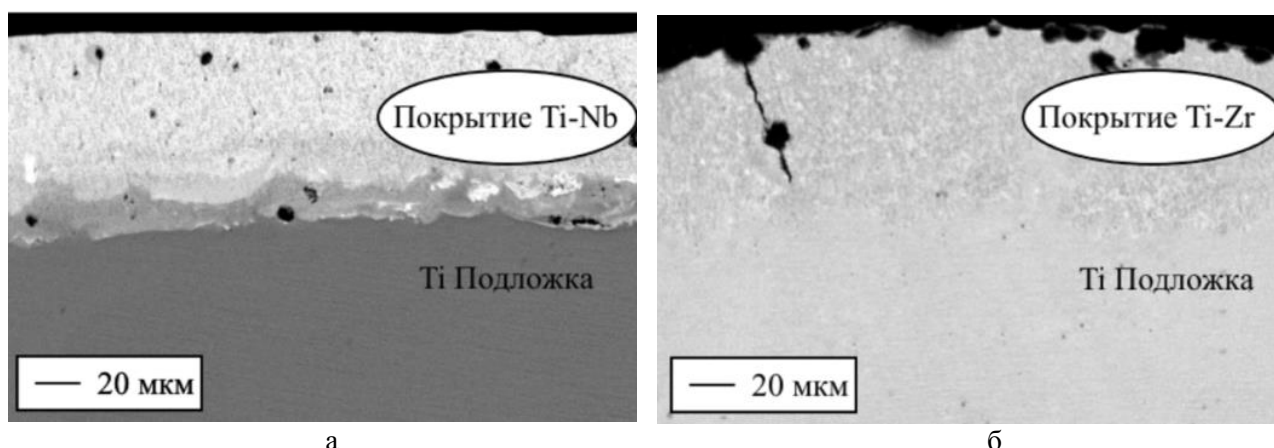


Рис. 1. Электронномикроскопические изображения поперечных шлифов электровзрывных покрытий:

а – покрытие системы Ti-Nb; б – покрытие системы Ti-Zr

Fig. 1. Electron microscopical images of cross-sections of the electroexplosive coatings:

a is a Ti-Nb coating; б is a Ti-Zr coating

Все материалы, используемые при создании исследуемых моделей, принимаются как линейно-упругие и изотропные. Характеристики применяемых материалов приведены в **табл. 1**. Параметры плотности губчатой и кортикальной кости в единицах Хаунсфилда равны 1362,94 и 472,21 соответственно [26]. Для представления данных значений в кг/м^3 использовалась формула $\rho = a + b \cdot H$, где коэффициент $a = 527$, $b = 0,44$, а H – плотность в единицах Хаунсфилда [27] (**табл. 1**).

Таблица 1. Основные характеристики материалов
Table 1. Main material properties

Материал	Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона	Плотность, кг/м^3
BT 6	110,0	0,3	4470,5
Ti-Zr	73,8	0,36	6520,0
Ti-Nb	84,3	0,35	8750,0
Кортикальная кость	14,8	0,3	1126,28
Губчатая кость	1,85	0,3	734,77

Все расчеты проводились согласно теории упругости для стационарного случая, поэтому второй закон Ньютона, служащий уравнением равновесия, в тензорной форме имеет вид

$$0 = \nabla \sigma + F_v, \quad (1)$$

где σ – напряжение; F_v – сила тела на объем.

Основным уравнением, связывающим тензор напряжений σ с деформацией ε , является обобщенный закон Гука:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon_v. \quad (2)$$

Модуль Юнга E и коэффициент Пуассона ν связаны с параметрами Ламе следующими уравнениями:

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}; \mu = \frac{E}{2(1 + \nu)}. \quad (3)$$

Последнее требуемое уравнение – кинематическая связь между смещениями u и деформациями ε . В тензорной форме (тензор деформации Коши)

$$\varepsilon_{el} = \frac{1}{2} [(\nabla u)^T + \nabla u], \quad (4)$$

где T – операция транспонирования.

Оценка распределения напряжений, возникающих под действием физиологических нагрузок, производится при помощи двумерной модели, представляющей из себя многослойную балку, состоящую из подложки, представленной во всех вариантах титановым сплавом BT6, промежуточного слоя, в разных вариантах симулирующего поведение покрытий систем Ti-Zr и Ti-Nb, и костного слоя (**табл. 2**). Также в настоящей работе исследуется вариант, не содержащий биоинертное электровзрывное покрытие, называемый в дальнейшем «контрольная модель». Костный слой представлен кортикальной и губчатой тканью. Длина модели составляет 1000 мкм, а толщина 300 мкм. Толщина титановой подложки равна 87 мкм, костной ткани – 150 мкм, а промежуточного слоя – 63 мкм.

Таблица 2. Основные характеристики исследуемых моделей
Table 2. Main characteristics of the studied models

Слой	Материал слоя	Толщина слоя, мкм
Модель с биоинертным покрытием системы Ti-Zr		
Титановая подложка	BT 6	83
Промежуточный слой	Биоинертное покрытие системы Ti-Zr	63
Костная ткань	Кортикальная костная ткань / губчатая костная ткань	150
Модель с биоинертным покрытием системы Ti-Nb		
Титановая подложка	BT6	83
Промежуточный слой	Биоинертное покрытие системы Ti-Zr	63
Костная ткань	Кортикальная костная ткань / губчатая костная ткань	150
Контрольная модель		
Титановая подложка	BT6	83
Промежуточный слой	BT6	63
Костная ткань	Кортикальная костная ткань / губчатая костная ткань	150
Длина всех моделей составляет 1000 мкм		

Образцы закреплены по грани BE (рис. 2), с противоположной стороны к грани JF прикладывается сжимающая сила F_1 , направленная по оси X и равная 114,6 Н, и изгибающая сила F_2 со значением 29 Н, направленная вверх по оси X, в сторону слоя костной ткани. Результирующая сила составляет 118,2 Н и направлена под углом 75° к поверхности имплантата. Грани АВ, АJ, АС, HD, FE являются свободными. Исследуемая модель была разделена на 745634 конечных элемента с размером от 0,02 до 1 мкм.

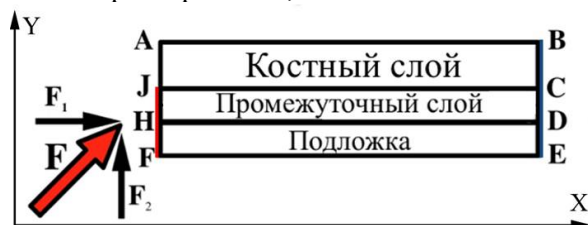


Рис. 2. Нагрузка и граничные условия
Fig. 2. Boundary and loading conditions

Результаты и их анализ

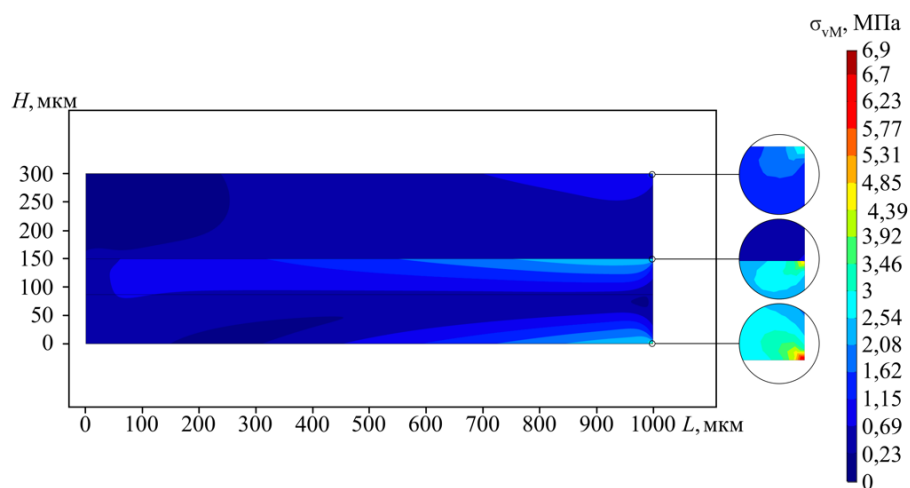
Конечно-элементное моделирование показало, что напряжения по критерию Мизеса сконцентрированы в объеме имплантата (рис. 3). Наибольшие напряжения расположены в двух крупных очагах, протянувшихся возле границы раздела JC и нижней грани FE. При этом их максимумы смещены к грани закрепления BE.

В слое костной ткани, ограниченном областью ABCJ, напряжения по критерию Мизеса возрастают с уменьшением модуля Юнга промежуточного слоя. Для контрольного образца с

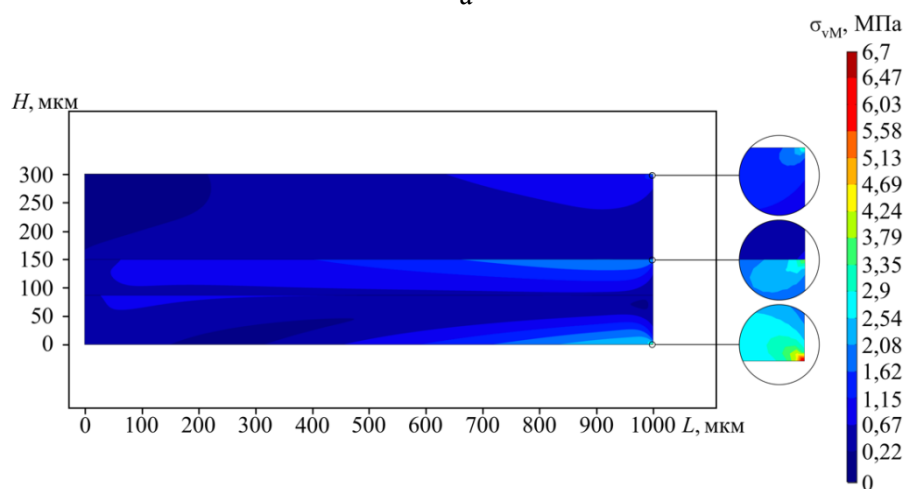
кортикальной костной тканью минимальные, средние и максимальные показатели напряжений по критерию Мизеса составляют $1,0727 \cdot 10^{-6}$, 0,3691 и 3,9655 МПа. Для образца с биоинертным покрытием системы Ti-Nb и аналогичным типом костной ткани минимум равен $1,2183 \cdot 10^{-6}$ МПа, средний показатель увеличивается до 0,3942 МПа, а максимум – до 4,1995 МПа. Среднее значение напряжений по критерию Мизеса в образце со слоем Ti-Zr и кортикальной тканью увеличивается до 0,4066 МПа, а максимальное – до 4,3123 МПа. Минимум, напротив, уменьшается до $1,1918 \cdot 10^{-6}$ МПа.

В образцах с губчатой костной тканью рассматриваемые типы напряжений имеют меньшие значения по сравнению с образцами, в которых моделируется кортикальная ткань, но изменяются аналогичным образом. Для контрольного варианта минимальные и максимальные показатели напряжений по Мизесу равны $4,9102 \cdot 10^{-7}$ и 1,0927 МПа при среднем показателе 0,1032 МПа. Для варианта со слоем покрытия Ti-Nb минимальное значение равно $5,8782 \cdot 10^{-7}$ МПа, максимальное – 1,2586 МПа, а среднее – 0,1198 МПа. В образце с покрытием системы Ti-Zr минимальное значение составляет $6,4073 \cdot 10^{-7}$ МПа, максимальное – 1,3506 МПа при среднем результате достигающем 0,1291 МПа.

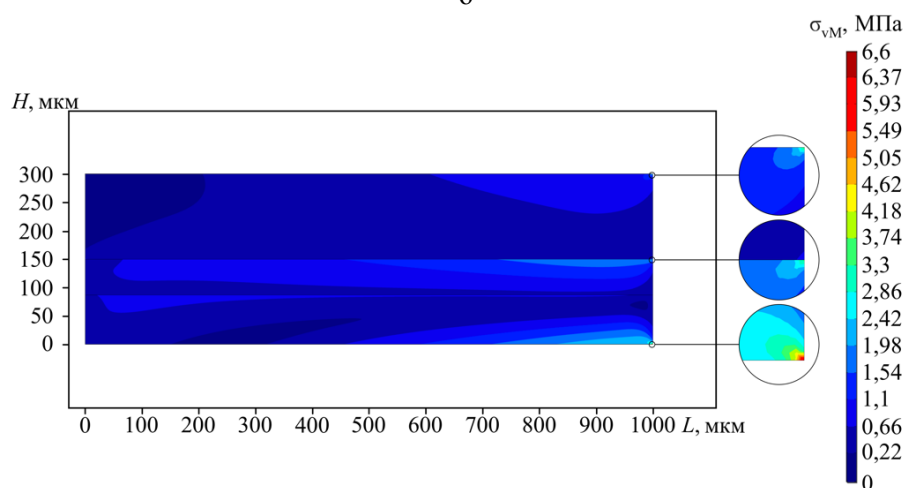
На границе между костной тканью и имплантатом, представленной гранью JC, напряжения по критерию Мизеса (рис. 4) убывают в вариантах с биоинертными покрытиями.



а



б



в

Рис. 3а. Распределение напряжений по Мизесу: а – контрольная модель (вариант с кортикальным слоем костной ткани); б – контрольная модель (вариант с губчатым слоем костной ткани); в – модель с покрытием системы Ti-Nb (вариант с кортикальным слоем костной ткани)

Fig. 3a. Von Mises stress distribution: а is a reference model (an option with cortical bone tissue); б is a reference model (an option with spongy bone tissue); в is a model with a Ti-Nb coating (an option with cortical bone tissue)

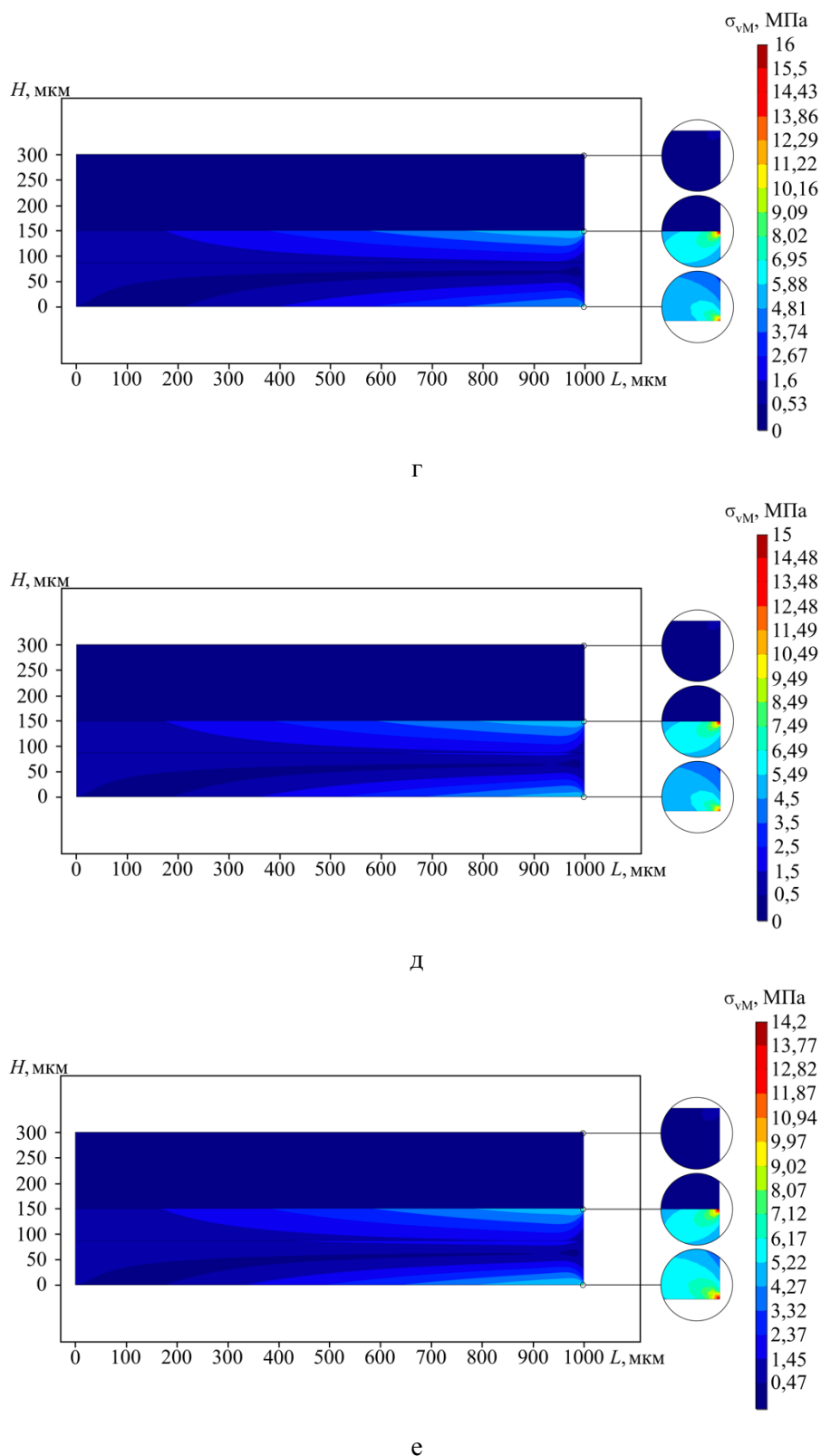


Рис. 36. Распределение напряжений по Мизесу: г – модель с покрытием системы Ti-Nb (вариант с губчатым слоем костной ткани); д – модель с покрытием системы Ti-Zr (вариант с кортикальным слоем костной ткани); е – модель с покрытием системы Ti-Zr (вариант с губчатым слоем костной ткани)
 Fig. 36. Von Mises stress distribution: г is a model with a Ti-Nb coating (an option with spongy bone tissue); д is a model with a Ti-Zr coating (an option with cortical bone tissue); е is a model with a Ti-Zr coating (an option with spongy bone tissue)

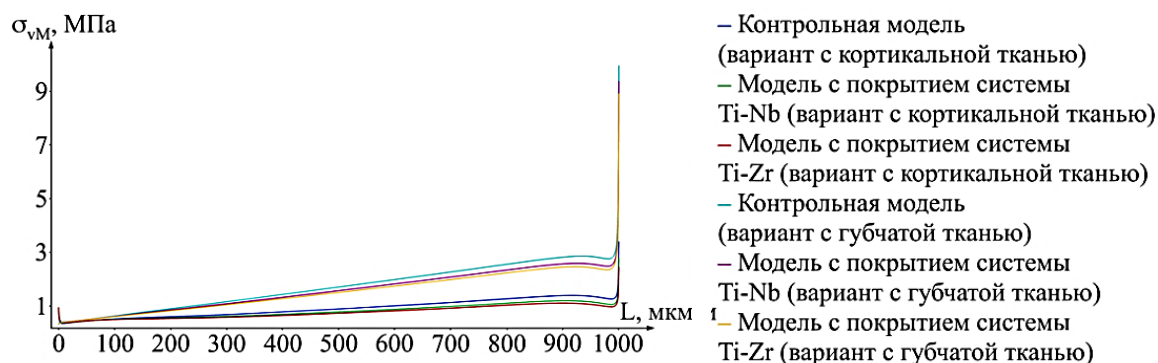


Рис. 4. Распределение напряжений на границе между имплантом и костной тканью (грань JC)
Fig. 4. Stress distribution on the boundary between the implant and bone tissue (boundary JC)

При моделировании образцов с кортикальной костной тканью наибольшие минимальные, средние и максимальные значения напряжений по Мизесу, наблюдаемые в контрольном образце, равны 0,3468, 0,9156 и 3,4144 МПа. Вариант с биоинертным покрытием системы Ti-Nb имеет меньшие показатели рассматриваемого типа напряжений. Так, минимальное значение напряжений по критерию Мизеса в данном случае равно 0,3626 МПа, среднее – 0,8097 МПа и максимальное – 2,7899 МПа. Минимальные напряжения были получены при моделировании образца, содержащего покрытие системы Ti-Zr. Для данной модели минимальное значение напряжений равно 0,3734 МПа, среднее значение – 0,7606, а максимальное – 2,4606 МПа.

Варианты с губчатой костной тканью ведут себя аналогичным образом. Минимальные и максимальные значения напряжений по критерию Мизеса равны 0,3032 и 9,9578 МПа, а среднее – 9,9578 МПа. Для модели с покрытием системы Ti-Nb напряжения данного типа, наблюдаемые на границе между данным типом костной ткани и промежуточным слоем, в среднем составляют 1,5833 МПа, при минимуме в 0,2964 МПа и максимуме, достигающем 9,3731 МПа. Наименьшие результаты были достигнуты при моделировании варианта с биоинертным слоем системы Ti-Zr. Минимальное значение напряжений по критерию Мизеса равно 0,2992 МПа, максимальное – 8,9331 МПа, а среднее уменьшилось до 1,5154 МПа.

В промежуточном слое толщиной 63 мкм, ограниченном плоскостью JCDH, наблюдается уменьшение средних значений всех типов рассматриваемых напряжений. Причем сильнее всего данный эффект проявляется в образцах с покрытием системы Ti-Zr.

В контрольной модели, содержащей кортикальную костную ткань, минимальные средние и максимальные значения напряжений по критерию Мизеса равны 0,2814, 1,0698 и 5,9249 МПа. Для образца с биоинертным покрытием системы Ti-Nb показатели рассматриваемой переменной

уменьшаются. В данном случае минимальные средние и максимальные напряжения имеют значения 0,2833, 0,9326 и 4,6520 МПа. Для модели с Ti-Zr-слоем минимальный показатель для напряжений по критерию Мизеса равен 0,2675 МПа, средний показатель – 0,8658 МПа, а максимальный уменьшается до 4,0112 МПа.

В моделях с губчатой костной тканью наблюдается аналогичная тенденция по уменьшению напряжений вместе со снижением модуля Юнга промежуточного слоя, однако их значения выше, чем в вариантах с кортикальной тканью. Для контрольного варианта минимальные и максимальные показатели напряжений по Мизесу равны 0,3323 и 19,5352 МПа при среднем показателе, составляющем 2,2102 МПа. Для варианта со слоем покрытия системы Ti-Nb минимальное значение равно 0,2627 МПа, максимальное – 18,2784 МПа, а среднее – 2,0689 МПа. В модели с покрытием Ti-Zr минимальное значение равно 0,2432 МПа, максимальное – 17,3587 МПа при среднем результате, достигающем 1,9912 МПа.

На расстоянии 63 мкм от интерфейса, разделяющего костную ткань и плоскость импланта, на грани HD, играющей в моделях роль границы раздела промежуточного слоя и материала подложки, напряжения по критерию Мизеса увеличиваются с уменьшением модуля Юнга промежуточного слоя (рис. 5).

В моделях с кортикальной костной тканью наименьшие значения напряжений по критерию Мизеса демонстрирует контрольный образец. Минимальный показатель равен 0,3100 МПа, средний – 0,6034 МПа, а максимальный представлен 0,7082 МПа. С уменьшением модуля Юнга моделируемого покрытия показатель исследуемой переменной увеличивается. В модели с биоинертным слоем системы Ti-Nb минимальные средние и максимальные показатели равны 0,3589, 0,6209 и 0,7008 МПа соответственно. В образце с Ti-Zr промежуточным слоем 0,3152 МПа является минимальным значением, 0,6292 МПа – средним, а 0,7004 МПа – максимальным.

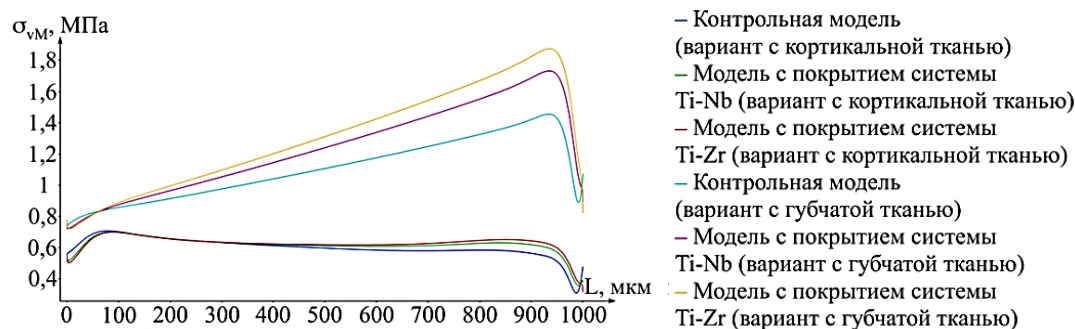


Рис. 5. Распределение напряжений на границе между промежуточным слоем и подложкой (грань HD)
Fig. 5. Stress distribution on the boundary between the intermediate layer and the substrate (boundary HD)

При моделировании образцов с губчатой костью напряжения изменяются аналогичным образом. Наибольшие значения напряжений по критерию Мизеса наблюдаются в контрольном образце. В данном случае минимальный показатель равен 0,7435 МПа, а максимальный – 1,4559 МПа при среднем значении в 1,1044. В варианте с Ti-Nb промежуточным слоем минимум уменьшается до 0,7175 МПа, максимум убывает до 1,7331 МПа при среднем результате в 1,2374 МПа. В модели с биоинертным покрытием Ti-Zr наблюдаются наименьшие значения напряжений по критерию Мизеса. Минимальное значение в данном случае равно 0,7222 МПа, максимальное – 1,8748 МПа, а среднее – 1,3089 МПа.

Как и в промежуточном слое, закономерное уменьшение напряжений по критерию Мизеса наблюдается и в слое подложки, ограниченном плоскостью HDEF.

В контрольной модели, содержащей кортикальную костную ткань, минимальные средние и максимальные значения напряжений по критерию Мизеса равны $1,7650 \cdot 10^{-4}$, 0,6101 и 8,4059 МПа. Для образца с биоинертным покрытием системы Ti-Nb показатели рассматриваемой переменной уменьшаются. В данном случае минимальные средние и максимальные значения составляют $2,7396 \cdot 10^{-4}$, 0,6077 и 8,1253 МПа. Для модели с Ti-Zr-слоем минимальный показатель для напряжений по критерию Мизеса равен $1,1007 \cdot 10^{-4}$ МПа, средний показатель – 0,6084 МПа, а максимальный уменьшается до 8,0011 МПа.

Варианты с губчатой костной тканью демонстрируют большие значения напряжений. Для контрольной модели минимальные и максимальные показатели напряжений по Мизесу равны $3,0457 \cdot 10^{-4}$ и 16,0305 МПа при среднем показателе в 1,1333 МПа. Для варианта с биоинертным слоем системы Ti-Nb минимальное значение равно $2,4720 \cdot 10^{-4}$ МПа, максимальное – 16,4231 МПа, а средние – 1,1971 МПа. Вариант с

покрытием системы Ti-Zr демонстрирует большие напряжения: минимальное значение составляет $1,0682 \cdot 10^{-4}$ МПа, максимальное – 16,6668 МПа при среднем результате, достигающем 1,2377 МПа.

Полученные при помощи двумерной трехслойной модели результаты не способны отразить реальные значения напряжений, возникающих в импланте и окружающей его костной ткани, так как для упрощения вычислений все материалы, применяемые в настоящей работе были заданы как изотропные, что не соответствует действительности. Разница между моделированием изотропной и анизотропной среды наглядно демонстрируется в работе [28]. Также для данной модели акцентируется большое внимание на минимальных и максимальных показателях, так как данная модель довольно проста и не отражает геометрических особенностей реального импланта и окружающей его костной структуры.

Однако при помощи описанных выше моделей в настоящей работе, как и в материалах [29, 30], удастся продемонстрировать неоднородность напряжено-деформированного состояния в системе «имплант–кость». Большие напряжения сконцентрированы в плоскости имплантата, а не в костном слое. Такая разница в распределении нагрузок обусловлена более высоким модулем Юнга сплава Ti6Al4V, применяемого в качестве конструкционного материала импланта. При этом демонстрируется, что напряжения, возникающие в кортикальной костной ткани, выше, чем в губчатой, а напряжения на границе между костным веществом и имплантатом, напротив, выше возле губчатой. Данный факт можно объяснить более высоким модулем Юнга кортикальной костной ткани.

Стоит также отметить, что на границе между покрытием и имплантом возникает второй пик напряжений, вызванный разницей значений модуля Юнга покрытия и подложки (рис. 6).

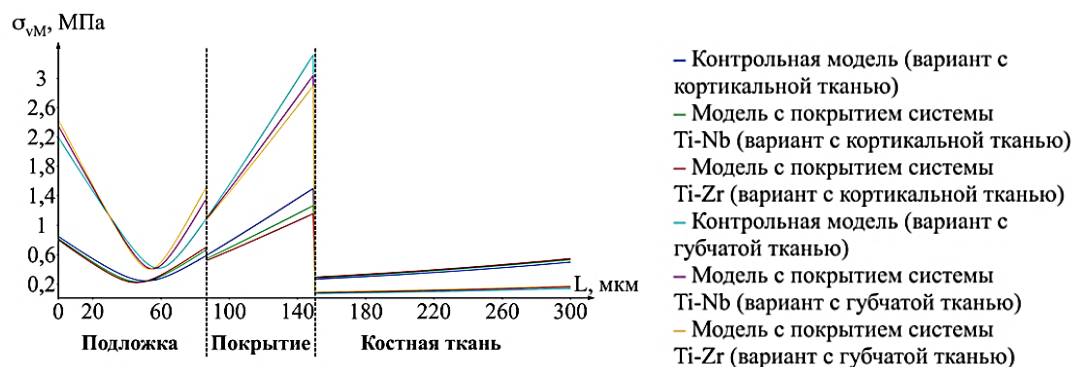


Рис. 6. Распределение напряжений по критерию Мизеса по поперечному сечению модели

Fig. 6. Von Mises stress distribution over the cross-section of the model

Заклучение

1. Механические напряжения, возникающие при эксплуатации имплантата в человеческом теле, распределяются неравномерно между ним и окружающей его костной тканью. Наибольшие напряжения по критерию Мизеса лежат на границе между костной тканью в объеме импланта.

2. Применение биоинертных покрытий систем Ti-Zr и Ti-Nb позволяет уменьшить напряжения на границе между имплантатом и костной тканью. При этом наибольший результат был получен при моделировании биоинертного покрытия системы Ti-Zr с более низким модулем Юнга, равным 73,8 МПа.

3. На границе между титановой подложкой и электровзрывным биоинертным покрытием образуется второй скачок механических напряжений, вызванный различием в значениях модулей Юнга покрытия и подложки.

4. Несмотря на простоту изученных моделей, можно с большой уверенностью судить о пригодности применения электровзрывных биоинертных покрытий в имплантатах.

Список литературы

1. Chen Q., Thouas G.A. Metallic implant biomaterials // Materials Science and Engineering: R: Reports. 2015. V. 87. 87 p.
2. Finite Element Modeling of Hip Implant Static Loading / K.Colic, A. Sedmak, A. Grbovic, et al // Procedia Engineering. 2016. V. 149. P. 257–262.
3. Sjögren B., Iregren A., Montelius J. Aluminum // Handbook on the Toxicology of Metals. 2015. P. 549–564.
4. Assem F.L., Oskarsson A. Vanadium // Handbook on the Toxicology of Metals. 2015. P. 1347–1367.
5. Darbre P.D. Environmental oestrogens, cosmetics and breast cancer // Best Practice & Research Clinical Endocrinology & Metabolism. 2006. V. 20. № 1. P. 121–143.
6. Jaishankar M., Tseten T., Anbalagan N. et al. Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals // Interdisciplinary Toxicology. 2014. V. 7. № 2. P. 60–72.

7. Rhoads L.S., Silkworth W.T., Roppolo M.L. et al. Cytotoxicity of nanostructured vanadium oxide on human cells in vitro // Toxicology in Vitro. 2010. V. 24. № 1. P. 292–296.
8. Wagner J.G., Van Dyken S.J., Wierenga J.R. et al. Ozone Exposure Enhances Endotoxin-Induced Mucous Cell Metaplasia in Rat Pulmonary Airways // Toxicological Sciences. 2003. V. 74. № 2. P. 437–446.
9. Bai Y.I., Deng Y., Zheng Y. et al. Characterization, corrosion behavior, cellular response and in vivo bone tissue compatibility of titanium–niobium alloy with low Young's modulus // Materials Science and Engineering: C. 2016. V. 59. P. 565–576.
10. Calderon Moreno J.M., Vasilescu E., Drob P. et al. Surface analysis and electrochemical behavior of Ti–20Zr alloy in simulated physiological fluids // Materials Science and Engineering: B. 2013. V. 178. № 18. P. 1195–1204.
11. Ureña J., Tsipas S., Jiménez- A. Morales, Gordo E. et al. In-vitro study of the bioactivity and cytotoxicity response of Ti surfaces modified by Nb and Mo diffusion treatments // Surface and Coatings Technology. 2018. V. 335. P. 148–158.
12. Kirmanidou Y., Sidira M., Drosou M.-E. et al. New Ti-alloys and surface modifications to improve the mechanical properties and the biological response to orthopedic and dental implants: A Review // BioMed Research International. 2016. P. 1–21.
13. Kuroda D., Niinomi M., Morinaga M. et al. Design and mechanical properties of new β type titanium alloys for implant materials // Materials Science and Engineering: A. 1998. V. 243. № 1–2. P. 244–249.
14. Jin W., Chu P.K. Orthopedic Implants // Reference Module in Biomedical Sciences. 2017. 15 p.
15. Long M., Rack H. Titanium alloys in total joint replacement – a materials science perspective // Biomaterials. 1998. V. 19. № 18. P. 1621–1639.
16. Li Y., Yang C., Zhao H. et al. New Developments of Ti-based alloys for biomedical applications // Materials. 2014. V. 7. № 3. P. 1709–1800.
17. Denard P.J., Raiss P., Gobeze R. et al. Stress shielding of the humerus in press-fit anatomic shoulder arthroplasty: review and recommendations for evaluation // Journal of Shoulder and Elbow Surgery. 2018. V. 27. № 6. P. 1139–1147.

18. Ivanova A.A., M.A. Surmeneva, Shugurov V.V., Koval N.N. et al. Physico-mechanical properties of Ti-Zr coatings fabricated via ion-assisted arc-plasma deposition // *Vacuum*. 2018. V. 149. P. 129–133.
19. Ureña J., Tabares E., Tsipias S. et al. Dry sliding wear behaviour of β -type Ti-Nb and Ti-Mo surfaces designed by diffusion treatments for biomedical applications // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2018. V. 91. P. 335–344.
20. Meijer G.J., Starmans F.J.M., Putter C. et al. The influence of a flexible coating on the bone stress around dental implants // *Journal of Oral Rehabilitation*. 1995. Vol. 22. № 2. P. 105–111.
21. Romanov D.A., Moskovskii S.V., Martusevich E.A. et al. Structural-phase state of the system “CdO-Ag coating / copper substrate” formed by electroexplosive method // *Metalurgija*. 2018. V. 57. P. 299–302.
22. Effect of electron-beam processing on structure of electroexplosive electroerosion resistant coatings of CuO-Ag system / D.A. Romanov, S.V. Moskovskii, K.V. Sosnin, et al // *Materials Research Express*. 2019. V. 8. № 6. 10 p.
23. Romanov D.A., Sosnin K.V., Gromov V.E. et al. Titanium-zirconium coatings formed on the titanium implant surface by the electroexplosive method // *Materials Letters*. 2019. Vol. 242. P. 79–82.
24. Limbert G., C. van Lierde, Muraru O.L. et al. Trabecular bone strains around a dental implant and associated micromotions – A micro-CT-based three-dimensional finite element study // *Journal of Biomechanics*. 2010. V. 43. № 7. P. 1251–1261.
25. Zhang Q.-H., Cossey A., Tong J. Stress shielding in bone of a bone-cement interface // *Medical Engineering & Physics*. 2016. V. 38. № 4. P. 423–426.
26. Chugh T., Ganeshkar S.V., Revankar A.V. et al. Quantitative assessment of interradicular bone density in the maxilla and mandible: implications in clinical orthodontics // *Progress in Orthodontics*. 2013. V. 14. № 1. 38 p.
27. Khan S.N., Warkhedkar R.M., Shyam A.K. Analysis of Hounsfield Unit of Human Bones for Strength Evaluation // *Analysis of Hounsfield Unit of Human Bones for Strength Evaluation. Procedia Materials Science*. 2014. V. 6. P. 512–519.
28. Hasegawa M., Saruta J., Hirota M. et al. A Newly Created Meso-, Micro-, and Nano-Scale Rough Titanium Surface Promotes Bone-Implant Integration // *International Journal of Molecular Sciences*. 2020. V. 21 № 783. 17 p.
29. Bosshardt D.D., Chappuis V., Buser D. Osseointegration of titanium, titanium alloy and zirconia dental implants: current knowledge and open questions // *Periodontology* 2000. 2006. V. 73 № 1. P. 22–40.
30. Hayes J.S., Richards R.G. Osseointegration of Permanent and Temporary Orthopedic Implants // *Encyclopedia of Biomedical Engineering*. 2019. P. 257–269.
2. Colic K., Sedmak A., Grbovic A. et al. Finite element modeling of hip implant static loading. *Procedia Engineering*. 2016, vol. 149, pp. 257–262.
3. Sjögren B., Iregren A., Montelius J. Aluminum. *Handbook on the Toxicology of Metals*. 2015, pp. 549–564.
4. Assem F.L., Oskarsson A. Vanadium. *Handbook on the Toxicology of Metals*. 2015, pp. 1347–1367.
5. Darbre P.D. Environmental oestrogens, cosmetics and breast cancer. *Best Practice & Research Clinical Endocrinology & Metabolism*. 2006, vol. 20, no. 1, pp. 121–143.
6. Jaishankar M., Tseten T., Anbalagan N. et al. Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary Toxicology*. 2014, vol. 7, no. 2, pp. 60–72.
7. Rhoads L.S., Silkworth W.T., Roppolo M.L. et al. Cytotoxicity of nanostructured vanadium oxide on human cells in vitro. *Toxicology in Vitro*. 2010, vol. 24, no. 1, pp. 292–296.
8. Wagner J.G., Van Dyken S.J., Wierenga J.R. et al. Ozone exposure enhances endotoxin-induced mucous cell metaplasia in rat pulmonary airways. *Toxicological Sciences*. 2003, vol. 74, no. 2, pp. 437–446.
9. Bai Y.I., Deng Y., Zheng Y. et al. Characterization, corrosion behavior, cellular response and in vivo bone tissue compatibility of titanium–niobium alloy with low Young’s modulus. *Materials Science and Engineering: C*. 2016, vol. 59, pp. 565–576.
10. Calderon Moreno J.M., Vasilescu E., Drob P. et al. Surface analysis and electrochemical behavior of Ti–20Zr alloy in simulated physiological fluids. *Materials Science and Engineering: B*. 2013, vol. 178, no. 18, pp. 1195–1204.
11. Ureña J., Tsipias S., Jiménez- A. Morales, Gordo E. et al. In-vitro study of the bioactivity and cytotoxicity response of Ti surfaces modified by Nb and Mo diffusion treatments. *Surface and Coatings Technology*. 2018, vol. 335, pp. 148–158.
12. Kirmanidou Y., Sidira M., Drosou M.-E. et al. New Ti-alloys and surface modifications to improve the mechanical properties and the biological response to orthopedic and dental implants: a review. *BioMed Research International*. 2016, pp. 1–21.
13. Kuroda D., Niinomi M., Morinaga M. et al. Design and mechanical properties of new β type titanium alloys for implant materials. *Materials Science and Engineering: A*. 1998, vol. 243, no. 1–2, pp. 244–249.
14. Jin W., Chu P.K. Orthopedic implants. *Reference Module in Biomedical Sciences*. 2017, 15 p.
15. Long M., Rack H. Titanium alloys in total joint replacement – a materials science perspective. *Biomaterials*. 1998, vol. 19, no. 18, pp. 1621–1639.
16. Li Y., Yang C., Zhao H. et al. New developments of Ti-based alloys for biomedical applications. *Materials*. 2014, vol. 7, no. 3, pp. 1709–1800.
17. Denard P.J., Raiss P., Gobeze R. et al. Stress shielding of the humerus in press-fit anatomic shoulder arthroplasty: review and recommendations for evaluation. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*. 2018, vol. 27, no. 6, pp. 1139–1147.

References

1. Chen Q., Thouas G.A. Metallic implant biomaterials. *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2015, vol. 87, 87 p.

18. Ivanova A.A., Surmeneva M.A., Shugurov V.V., Koval N.N. et al. Physico-mechanical properties of Ti-Zr coatings fabricated via ion-assisted arc-plasma deposition. *Vacuum*. 2018, vol. 149, pp. 129–133.
19. Ureña J., Tabares E., Tsipias S. et al. Dry sliding wear behaviour of β -type Ti-Nb and Ti-Mo surfaces designed by diffusion treatments for biomedical applications. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2018, vol. 91, pp. 335–344.
20. Meijer G.J., Starmans F.J.M., Putter C. et al. The influence of a flexible coating on the bone stress around dental implants. *Journal of Oral Rehabilitation*. 1995, vol. 22, no. 2, pp. 105–111.
21. Romanov D.A., Moskovskii S.V., Martusevich E.A. et al. Structural-phase state of the system “CdO-Ag coating / copper substrate” formed by electroexplosive method. *Metalurgija*. 2018, vol. 57, pp. 299–302.
22. Romanov D.A., Moskovskii S.V., Sosnin K.V. et al. Effect of electron-beam processing on structure of electroexplosive electroerosion resistant coatings of CuO-Ag system. *Materials Research Express*. 2019, vol. 8, no. 6, 10 p.
23. Romanov D.A., Sosnin K.V., Gromov V.E. et al. Titanium-zirconium coatings formed on the titanium implant surface by the electroexplosive method. *Materials Letters*. 2019, vol. 242, pp. 79–82.
24. Limbert G., C. van Lierde, Muraru O.L. et al. Trabecular bone strains around a dental implant and associated micromotions – A micro-CT-based three-dimensional finite element study. *Journal of Biomechanics*. 2010, vol. 43, no. 7, pp. 1251–1261.
25. Zhang Q.-H., Cossey A., Tong J. Stress shielding in bone of a bone-cement interface. *Medical Engineering & Physics*. 2016, vol. 38, no. 4, pp. 423–426.
26. Chugh T., Ganeshkar S.V., Revankar A.V. et al. Quantitative assessment of interradicular bone density in the maxilla and mandible: implications in clinical orthodontics. *Progress in Orthodontics*. 2013, vol. 14, no. 1, 38 p.
27. Khan S.N., Warkhedkar R.M., Shyam A.K. Analysis of Hounsfield unit of human bones for strength evaluation. *Procedia Materials Science*. 2014, vol. 6, pp. 512–519.
28. Hasegawa M., Saruta J., Hirota M. et al. A newly created meso-, micro-, and nano-scale rough titanium surface promotes bone-implant integration. *International Journal of Molecular Sciences*. 2020, vol. 21, no. 783, 17 p.
29. Bosshardt D.D., Chappuis V., Buser D. Osseointegration of titanium, titanium alloy and zirconia dental implants: current knowledge and open questions. *Periodontology* 2000. 2006, vol. 73, no. 1, pp. 22–40.
30. Hayes J.S., Richards R.G. Osseointegration of permanent and temporary orthopedic implants. *Encyclopedia of Biomedical Engineering*. 2019, pp. 257–269.

Поступила 28.12.2021; принята к публикации 17.01.2022; опубликована 25.03.2022
Submitted 28/12/2021; revised 17/01/2022; published 25/03/2022

Филяков Артем Дмитриевич – научный сотрудник,
Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.
Email: filyakov.1999@mail.ru. ORCID 0000-0002-8168-8809

Романов Денис Анатольевич – доктор технических наук, старший научный сотрудник,
Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.
Email: romanov_da@physics.sibsiu.ru. ORCID 0000-0002-6880-2849

Будовских Евгений Александрович – доктор технических наук, старший научный сотрудник,
Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.
Email: budovskikh@mail.ru. ORCID 0000-0002-3795-0726

Artem D. Filyakov – researcher,
Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.
Email: filyakov.1999@mail.ru. ORCID 0000-0002-8168-8809

Denis A. Romanov – DrSc (Eng.), senior researcher,
Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.
Email: romanov_da@physics.sibsiu.ru. ORCID 0000-0002-6880-2849

Evgeny A. Budovskikh – DrSc (Eng.), senior researcher,
Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.
Email: budovskikh@mail.ru. ORCID 0000-0002-3795-0726

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

УДК 621.97.042

DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-1-83-94



ИДЕНТИФИКАЦИЯ НАЛАДОЧНЫХ СМЕЩЕНИЙ ШТАМПОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТЬЮ ПОКОВОК КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ БОЛЬШЕГРУЗНЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

Сафаров Д.Т.¹, Чех А.В.²

¹Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета, Набережные Челны, Россия

²Кузнечный завод ПАО «Камский автомобильный завод», Набережные Челны, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Разработанная авторами методика нахождения параметров распределения припуска по коренным и шатунным шейкам поковки коленчатого вала большегрузного автомобиля позволяет эффективно контролировать партии поковок коленчатого вала большегрузных автомобилей, а также выявлять поковки, годные по отдельным геометрическим показателям, но не обеспечивающие припуск по шатунным шейкам коленчатого вала. Разработанная методика имеет больший потенциал в части не только контроля, но и управления геометрической точностью поковок в операциях изготовления поковок на автоматической линии горячей объемной штамповки, для чего необходимо получить математические модели, обеспечивающие возможность управления геометрическими параметрами поковки коленчатого вала. **Используемые методы.** Математические методы аппроксимации экспериментальных графиков степенными функциями. **Новизна.** Впервые разработана методика диагностирования наладок штампового оборудования, связывающая наладочные смещения штампового оборудования автоматической линии горячей объемной штамповки и показатели распределения припуска по коренным и шатунным шейкам поковок коленчатых валов большегрузных автомобилей. **Результаты.** Впервые получены математические модели, связывающие наладочные параметры штампового оборудования автоматической линии с параметрами распределений припуска по коренным и шатунным шейкам поковок коленчатых валов большегрузных автомобилей. **Практическая значимость.** Обеспечение возможности управления параметрами припуска по коренным и шатунным шейкам поковки в зависимости от параметров наладки и фактического технического состояния штампового оборудования автоматической линии горячей объемной штамповки поковок коленчатых валов большегрузных автомобилей.

Ключевые слова: поковка коленчатого вала, горячая объемная штамповка, параметры распределения припуска, коренные и шатунные шейки, наладочные смещения штампового оборудования.

© Сафаров Д.Т., Чех А.В., 2022

Для цитирования

Сафаров Д.Т., Чех А.В. Идентификация наладочных смещений штампового оборудования для управления геометрической точностью поковок коленчатых валов большегрузных автомобилей // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №1. С. 83–94. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-1-83-94>



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

IDENTIFYING ADJUSTMENT OFFSETS OF METAL-FORMING EQUIPMENT TO CONTROL GEOMETRICAL ACCURACY OF CRANKSHAFT FORGINGS FOR HEAVY TRUCKS

Safarov D.T.¹, Chekh A.V.²

¹Naberezhnye Chelny Institute (branch) of Kazan (Volga Region) Federal University, Naberezhnye Chelny, Russia

²Forging Plant of PJSC Kama Automobile Plant, Naberezhnye Chelny, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The method, developed by the authors for determining the parameters of the allowance distribution along main and connecting rod journals of a crankshaft forging for a heavy truck, contributes to efficient control of batches of crankshaft forgings for heavy trucks and identification of forgings that are acceptable for individual geometric parameters, but fail to provide an allowance for connecting rod journals of the crankshaft. The developed technique has a greater potential in terms of not only monitoring, but also control of the geometrical accuracy of forgings in the operations of manufacturing forgings on an automatic hot forging line. Therefore, mathematical models should be designed to control the geometric parameters of the crankshaft forging. **Methods Applied.** Mathematical methods of approximation of experimental graphs by power functions. **Originality.** For the first time, a technique has been developed to diagnose the adjustment of metal-forming equipment, correlating the adjustment offsets of metal-forming equipment of the automatic hot forging line and allowance distribution indicators for main and connecting rod journals of crankshaft forgings for heavy trucks. **Results.** For the first time, the authors developed the mathematical models, correlating the adjustment parameters of metal-forming equipment of the automatic line and allowance distribution parameters for main and connecting rod journals of crankshaft forgings for heavy trucks. **Practical Relevance.** It lies in providing control of the parameters of the allowance for main and connecting rod journals of forgings, depending on the adjustment parameters and an actual technical condition of the metal-forming equipment of the automatic hot forging line for crankshaft forgings for heavy trucks.

Keywords: crankshaft forging, hot forging, allowance distribution parameters, main and connecting rod journals, adjustment offsets of metal-forming equipment.

For citation

Safarov D.T., Chekh A.V. Identifying Adjustment Offsets of Metal-Forming Equipment to Control Geometrical Accuracy of Crankshaft Forgings for Heavy Trucks. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 1, pp. 83–94. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-1-83-94>

Введение

Поковки коленчатых валов большегрузных автомобилей изготавливаются в технологическом маршруте, включающем операции транспортирования, нагрева, горячей пластической деформации материала заготовки, термической обработки. Каждая из перечисленных операций вносит свои отклонения в изготавливаемый полуфабрикат поковки, наиболее значимыми являются операции горячей пластической деформации. К ним относятся операции вальцовки, штамповки, вырубки, выкрутки и правки.

В настоящее время имеются достаточно подробные исследования различных факторов, действующих в процессах штамповки поковок коленчатых валов – деформаций и коробления поковок, обеспечения балансируемости и износа штампо-

вой оснастки [1–9]. В настоящее время исследования по влиянию выполнения наладочных смещений на геометрические параметры штамповки поковок коленчатых валов большегрузных автомобилей не выявлено. В процессе горячей объемной штамповки поковок действуют производственные факторы, влияющие на геометрические параметры поковки коленчатого вала. К ним можно отнести фактор нагрева или охлаждения штамповой оснастки и полуфабриката, износ штампов в операциях штамповки, вырубки и правки, наличия смазочного материала в ручьях штамповочного штампа, наличие или отсутствие окалины в ручьях штампов штамповки и правки, стабильность срабатывания укладчиков поковок в штамповую оснастку, перекладку и транспортирование и т.д.

Наладчики автоматической линии обеспечивают регулирование наладочных параметров про-

цесса горячей объемной штамповки по изменению закрытой высоты штампа, параметров продольных и поперечных смещений верхних и нижних вставок штаповочного пресса, регулировку угла выкрутки, доработку гравюр штампов в первом и втором установе правочной операции, а также своевременную смазку и отсутствие окалины в ручьях штампов. Величина и своевременность выполнения наладочных смещений зависит от квалификации наладчиков автоматической линии, а следовательно, и геометрической точности изготавливаемых партий поковок коленчатых валов.

Регулировка геометрических параметров поковки выполняется по данным измерений поковки контролерами ОТК. Контролеры в соответствии с картой разметки измеряют геометрические параметры поковки коленчатого вала: диаметральные размеры коренных и шатунных шеек, угловые отклонения шатунных шеек, изгиб по третьей коренной шейке в двух плоскостях, продольные и поперечные смещения по разьему штампа, высотные размеры противовесов и т.д. Данные измерений они сообщают наладчикам, которые выявляют в них отклонения и принимают экспертные решения о необходимости тех или иных наладочных смещений штампового оборудования для обеспечения соответствия геометрических параметров партий изготавливаемых поковок коленчатых валов.

Изменение наладочных смещений штампового оборудования – ковочного и правочного пресса – одновременно изменяет значения всех контроли-

руемых геометрических показателей точности поковки. Заранее точно предсказать, как изменится весь комплекс показателей практически невозможно. Поэтому предложено обеспечить регулирование процесса штамповки по всем операциям технологического маршрута не по отдельным геометрическим показателям точности – диаметральным размерам коренных и шатунных шеек, отклонениям их углового положения, изогнутости поковки по третьей коренной шейке и т.д., а по интегральному показателю точности поковки коленчатого вала – распределению припуска по коренным и шатунным шейкам. Этот показатель обеспечивает ожидаемую потребителем точность поковки коленчатого вала при любом сочетании отдельных метрологических показателей точности поковки.

Полученные результаты и их обсуждение

Для обеспечения регулирования процесса авторами статьи разработана методика координатных цеховых измерений поковки коленчатого вала и расчета припуска, а также программный продукт, автоматизирующий процессы расчета и вывода данных в виде визуальной формы, позволяющей проанализировать распределение припуска. Измерения выполняются на разработанном специализированном контрольном приспособлении, конструкция которого позволяет выполнять измерение высотных размеров поковки коленчатого вала строго в заданных угловых фазах (рис. 1).

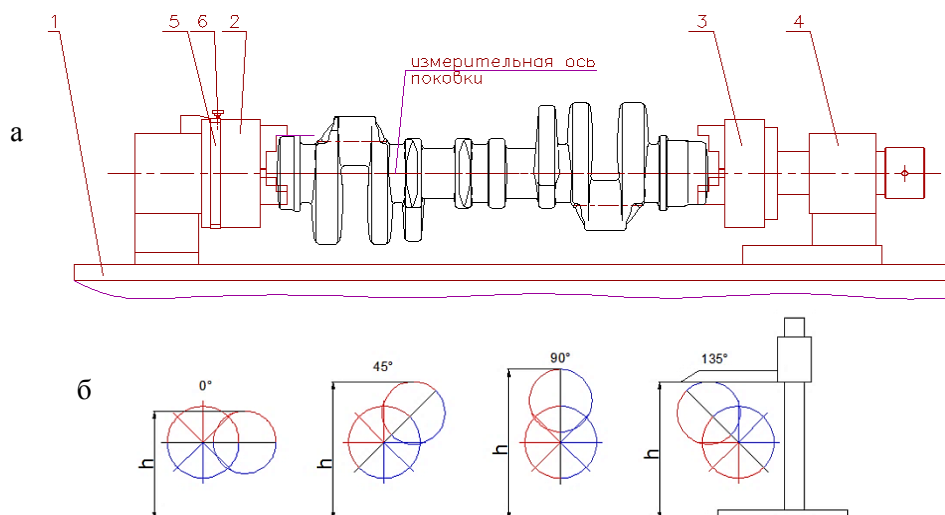


Рис. 1. Контрольное приспособление координатных измерений высотных параметров: а – конструкция приспособления: 1 – станина; 2, 3 – патрон самоцентрирующий; 4 – корпус; 5 – угловой вращающийся лимб; 6 – стопорный винт лимба; б – пример последовательности измерений высотных параметров в различных угловых фазах

Fig. 1. Control device for coordinate measurements of height parameters: а is design of the device: 1 is a frame; 2, 3 is a self-centering carriage; 4 is a housing; 5 is an angular rotating limb; 6 is a locking screw of the limb; б is an example of a sequence of measurements of height parameters in various angular phases

Угловой шаг задается условиями базирования поковки в самоцентрирующих призмах во фрезерно-центровальной операции, а также угловыми фазами часто возникающих дефектов в виде черноты после механической обработки поковок после операции охватывающего фрезерования (рис. 2) и выполняется через 45° .

На рис. 3 приведен пример графической формы распределения припуска по данным измерений поковки коленчатого вала контролерами ОТК. По первой, третьей и четвертой шатунной, а также по третьей коренной шейке в отдельных угловых фазах имеется недостаточность припуска, выделенная на круговых диаграммах красным цветом. Поскольку наладчики принимают решение об изменении наладочных параметров экспертно, на основании опыта штамповки, уверенности в результативности принятых корректирующих действий нет. Возникает необходимость в разработке механизма, позволяющего выявить влияние каждого из наладочных смещений штамповочного оборудования на величину распределение припуска.

Для реализации указанной выше потребности разработан механизм диагностирования наладочных смещений, позволяющий найти необходимые математические зависимости. На рис. 4 приведена схема диагностирования наладочных смещений по изменению закрытой высоты штампа ковочного пресса на штамповочной операции. Сначала выполняется штамповка по-

ковки в автоматическом режиме без изменения наладочных смещений, после чего выполняется наладка с изучаемым наладочным смещением. Проводятся измерения двух поволовок коленчатого вала с заполнением карт разметок 1 и 2 (рис. 5). Данные карт разметок анализируются и определяется математическая модель изменения отклонений профиля шеек коленчатого вала от минимальной границы припуска.

На втором этапе процесс штамповки повторяется, после чего математические модели двух наладок сравниваются. При совпадении или незначительном различии математических моделей отклонений их используют для математической коррекции припуска в процессе поиска значений наладочных смещений. В случае значительного расхождения полученных значений припусков инициируется еще одна наладка. Если и в процессе ее выполнения закономерность не выявляется, то выполняется поиск причин отсутствия стабильности значений и ее устранение.

Как видим, для каждой коренной и шатунной шейки изменения припуска индивидуальны, их изменение зависит от множества технологических факторов, действующих операций вальцовки, штамповки, обрезки, выкрутки и правки – индивидуального износа штамповочного оборудования, температурных изменений, износа ручьев штамповочного и калибровочного штампов, жесткости прессового оборудования и т.д.

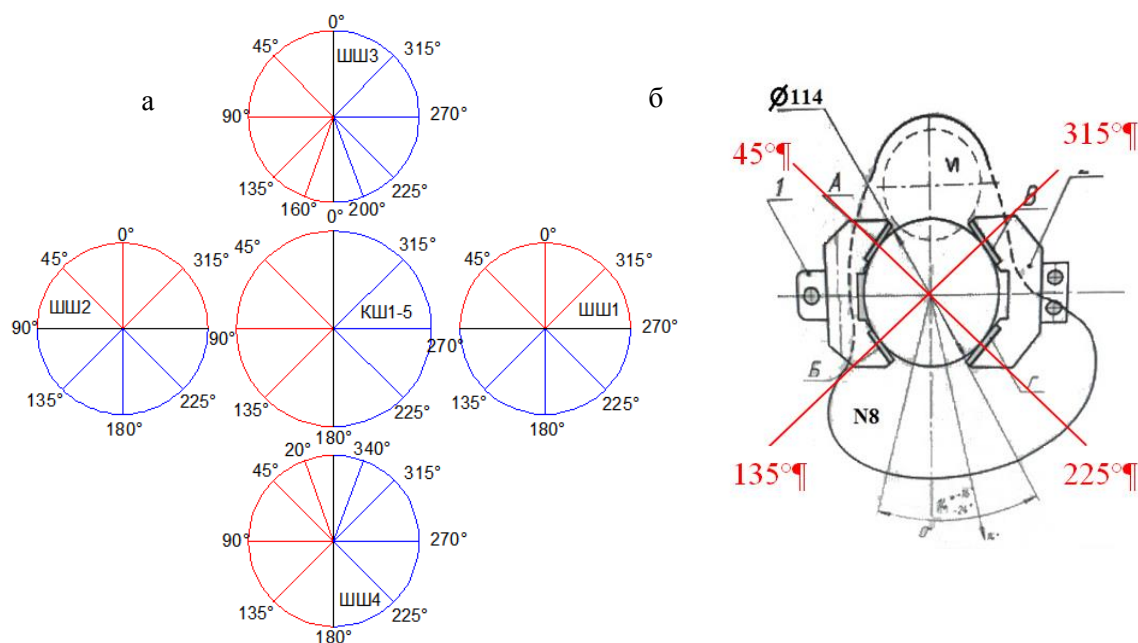


Рис. 2. Координаты точек измерений коренных и шатунных шеек поковки коленчатого вала:

а – угловые фазы измерений; б – схема базирования поковки на фрезерно-центровальной операции

Fig. 2. Coordinates of the measurement points of the main and connecting rod journals of the crankshaft forging:

а are angular phases of measurements; б is a scheme of basing the forging on the milling-centering operation

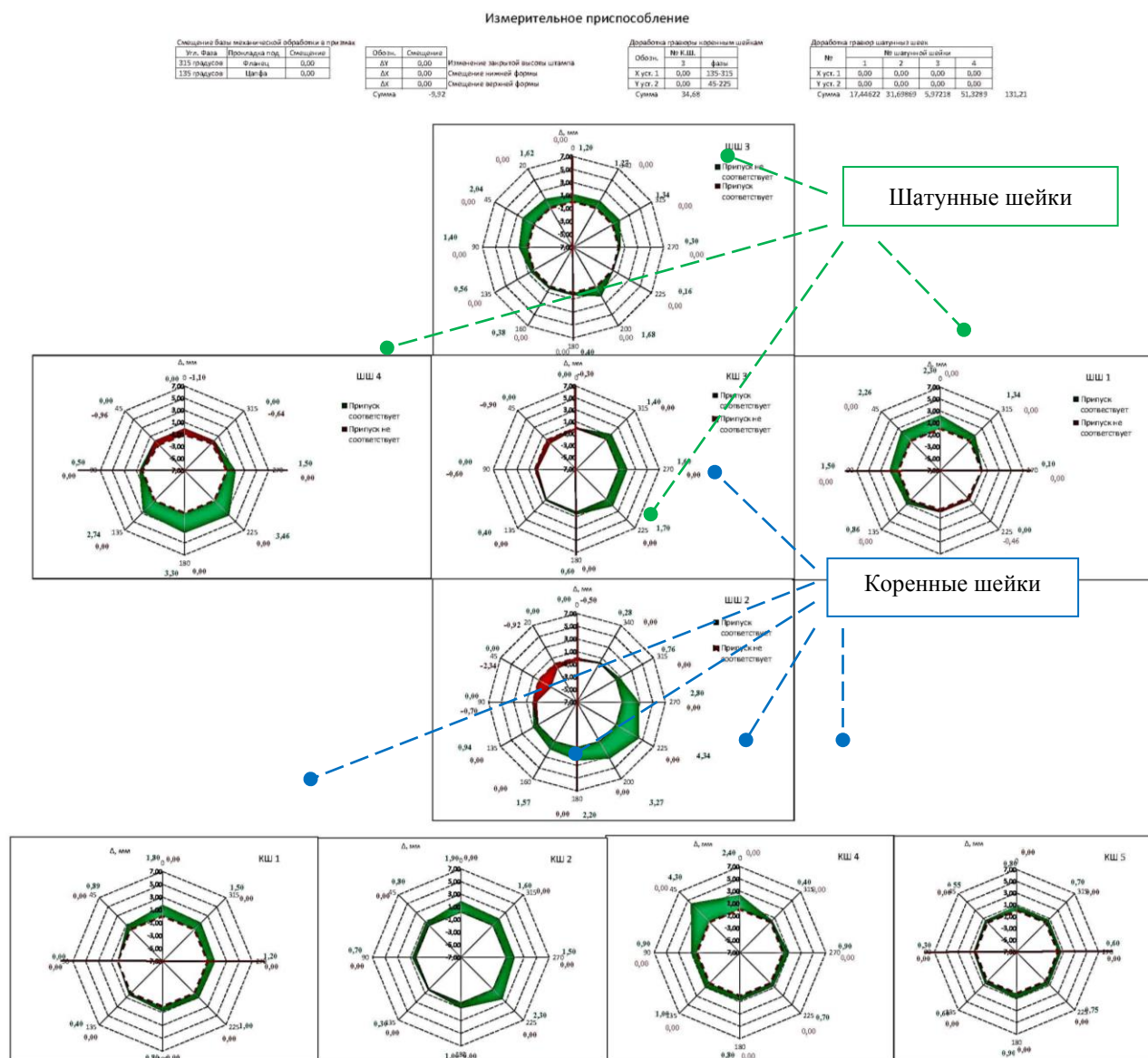


Рис. 3. Исходные диаграммы распределения припуска по коренным и шатунным шейкам поковки коленчатого вала

Fig. 3. Original diagrams of the allowance distribution along the main and connecting rod journals of the crankshaft forging

Учесть их изменение в процессах математического моделирования, например в программных продуктах QForm [10–13] и других аналогичных системах автоматизированного конструкторского проектирования поковок, невозможно.

Для того чтобы определить действующие законы изменения припусков по коренным и шатунным шейкам, необходимо найти их разность в наладках 1 и 2, 3 и 4, выполненных с одними и теми же наладочными смещениями.

Например, для нулевой угловой фазы эта разность находится по следующей формуле:

$$\Delta_0 = \delta_{0_2} - \delta_{0_1}, \quad (1)$$

где δ_{0_2} – отклонение профиля в нулевой измерительной фазе от границы минимального припуска во второй наладке, мм; δ_{0_1} – отклонение профиля в нулевой измерительной фазе от границы минимального припуска в первой наладке, мм.

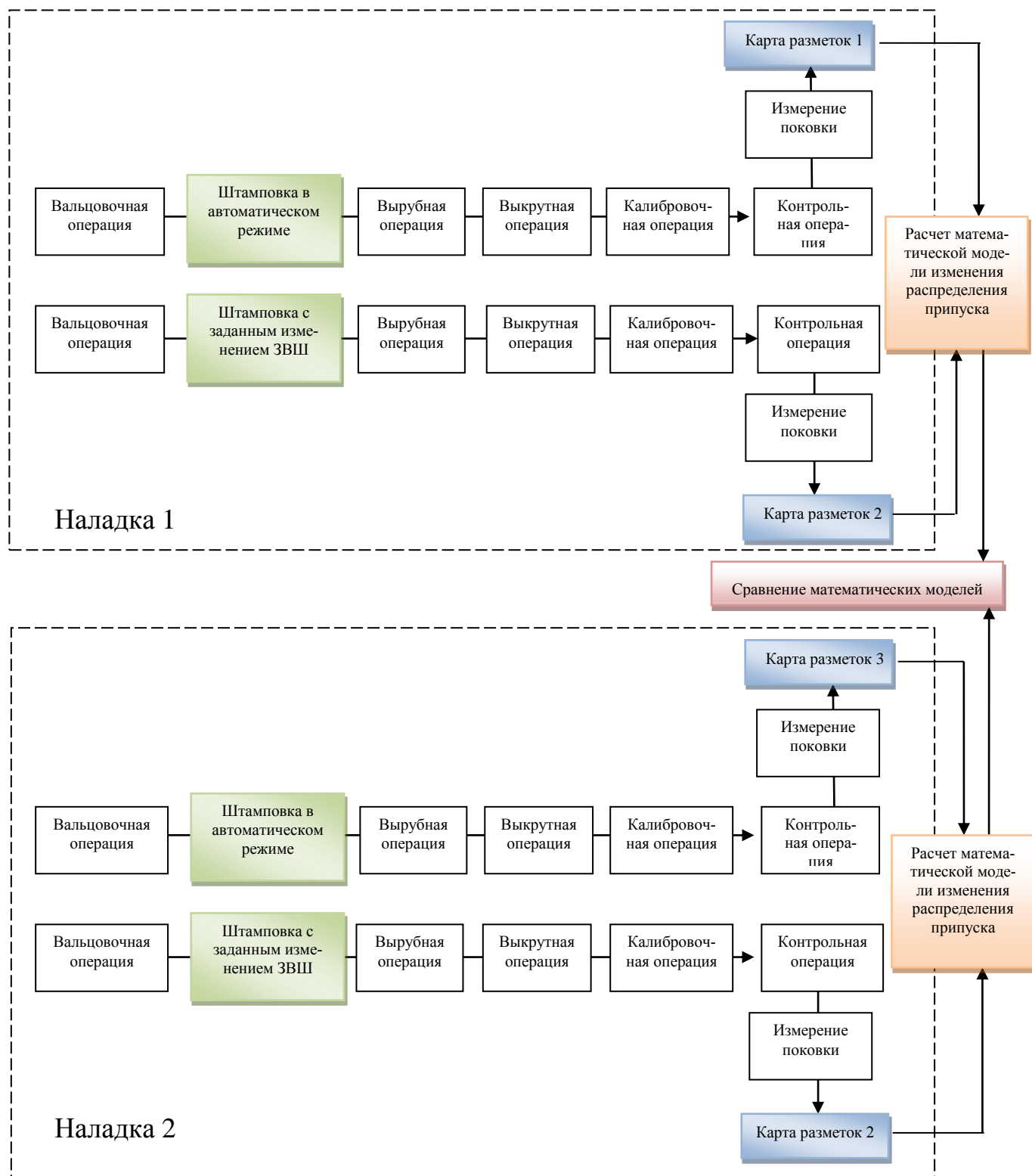


Рис. 4. Схема выполнения диагностики наладки штампового оборудования по изменению закрытой высоты штампа

Fig. 4. Diagnostics of the adjustment of metal-forming equipment to change shut height of the die



а



б

Рис. 5. Процесс выполнения наладки: а – процесс штамповки поковок коленчатых валов;
б – измерения поковки коленчатого вала
Fig. 5. The adjustment process: a is a process of stamping the crankshaft forgings;
б are measurements of the crankshaft forging

Для угловой фазы 45° эта разность находится по следующей формуле:

$$\Delta_{45} = \delta_{45_2} - \delta_{45_1}, \quad (2)$$

где δ_{45_2} – отклонение профиля в нулевой измерительной фазе от границы минимального припуска во второй наладке, мм; δ_{45_1} – отклонение профиля в нулевой измерительной фазе от границы минимального припуска в первой наладке, мм.

Для остальных угловых фаз разности находятся аналогично.

В качестве примера приведем результаты исследований влияния закрытой высоты штампа штамповочного пресса (рис. 5, а) на распределение припуска. Исследование этого наладочного смещения важно, поскольку в процессе штамповки ведется его изменение для обеспечения компенсации температурных расширений в системе штамп-пресс. В табл. 1 приведены рассчитанные для каждой измерительной фазы разности значений припуска. На рис. 6 приведены графики изменения величины припуска по угловым фазам шатунных шеек коленчатого вала от изменения уменьшения закрытой высоты штампа на 1 мм и вид аппроксимирующей их степенной функции.

Как видим, графики изменения припуска по шатунным шейкам, выполненные в различных наладках совпадают. Для четвертой шатунной шейки профили совпадают не в полной мере, это объясняется тем, что в первой наладке штамп был не полностью прогрет, вследствие этого деформация металла по четвертой коренной шейке прошла не так, как в прогретом штампе. Для вывода математических моделей использовались данные со второй наладки, выполненные на полностью прогретом штампе. В табл. 2 приведены математические модели, связывающие наладочные смещения штампового оборудования и штамповые смещения. Найденные математические модели используются для ручного подбора значений наладочных смещений штампового оборудования. Математические модели необходимо постоянно обновлять в зависимости от значимых изменений штамповой оснастки, например при изменении форм гравюр штамповых вставок или после текущего ремонта оборудования автоматической линии.

На рис. 7 приведены круговые диаграммы распределения припуска после подбора значений наладочных смещений штампового оборудования. Для устранения нехватки припуска по начальным данным круговых диаграмм потребовалось уменьшить закрытую высоту штампа на величину 0,6 и выполнить высвобождение гравюр калибровочного штампа соседним со второй шатунной шейкой противовеса на величину 1 мм.

Таблица 1. Разности отклонений профиля от границы минимального припуска в исследуемых наладках для шатунных шеек коленчатого вала
 Table 1. Difference in profile deviations from the minimum allowance limit in the studied settings for connecting rod journals of crankshaft forgings

Шейка коленвала	Угловые фазы, град	Наладка 1-2	Наладка 3-4	Шейка коленвала	Наладка 1-2	Наладка 3-4
		δ , мм	δ , мм		δ , мм	δ , мм
ШШ 1	0	0,00	-1,50	ШШ 3	0,50	0,30
	45	1,00	1,70		-1,00	-1,00
	90	1,00	1,30		-0,80	-1,40
	135	1,30	1,60		-0,80	-0,60
	180	1,20	0,70		-0,50	-0,60
	225	-0,20	-0,50		0,50	0,80
	270	-0,90	-0,90		0,20	0,40
	315	-1,00	-2,60		0,50	1,30
ШШ 2	0	0,30	1,00	ШШ 4	1,20	1,20
	45	0,40	0,70		1,00	1,20
	90	1,80	2,30		0,10	1,60
	135	1,80	3,20		0,30	1,50
	160	1,50	1,60		0,00	1,00
	180	1,00	0,00		-0,50	-0,50
	225	-0,60	-2,30		-0,50	-1,80
	270	-1,70	-2,30		-0,30	-2,00
	315	-2,30	-1,80		0,00	-0,30
	340	-1,00	-0,70		1,00	1,00

Таблица 2. Степенные полиномы, аппроксимирующие графики изменения геометрических размеров коленчатых валов при уменьшении закрытой высоты штампа на величину 1 мм
 Table 2. Power polynomials, approximating graphs of changes in the geometric dimensions of crankshaft forgings with a decrease in the shut height of the die by 1 mm

Шейка коленчатого вала	Степенной полином	Надежность аппроксимации
1 КШ	$y = -0,0043x^4 + 0,1559x^3 - 1,5823x^2 + 5,3194x - 4,1002$	$R^2 = 0,9272$
2 КШ	$y = 0,0677x^3 - 0,9374x^2 + 3,4258x - 2,4$	$R^2 = 0,9445$
3 КШ	$y = 0,0626x^3 - 0,8847x^2 + 3,2336x - 1,6857$	$R^2 = 0,8893$
4 КШ	$y = -0,0167x^5 + 0,3859x^4 - 3,2795x^3 + 12,41x^2 - 19,8x + 10,125$	$R^2 = 0,9397$
5 КШ	$y = -0,0051x^4 + 0,0922x^3 - 0,5804x^2 + 1,5485x - 0,8831$	$R^2 = 0,9025$
1 ШШ	$y = 0,0026x^5 - 0,0774x^4 + 0,8852x^3 - 4,8809x^2 + 12,421x - 9,8$	$R^2 = 0,9652$
2 ШШ	$y = -0,0064x^5 + 0,1848x^4 - 1,9047x^3 + 8,3066x^2 - 14,403x + 8,8067$	$R^2 = 0,9894$
3 ШШ	$y = 0,004x^4 - 0,1138x^3 + 1,1092x^2 - 3,8867x + 3,175$	$R^2 = 0,9279$
4 ШШ	$y = -0,0143x^4 + 0,3324x^3 - 2,3652x^2 + 5,3333x - 1,7911$	$R^2 = 0,9638$

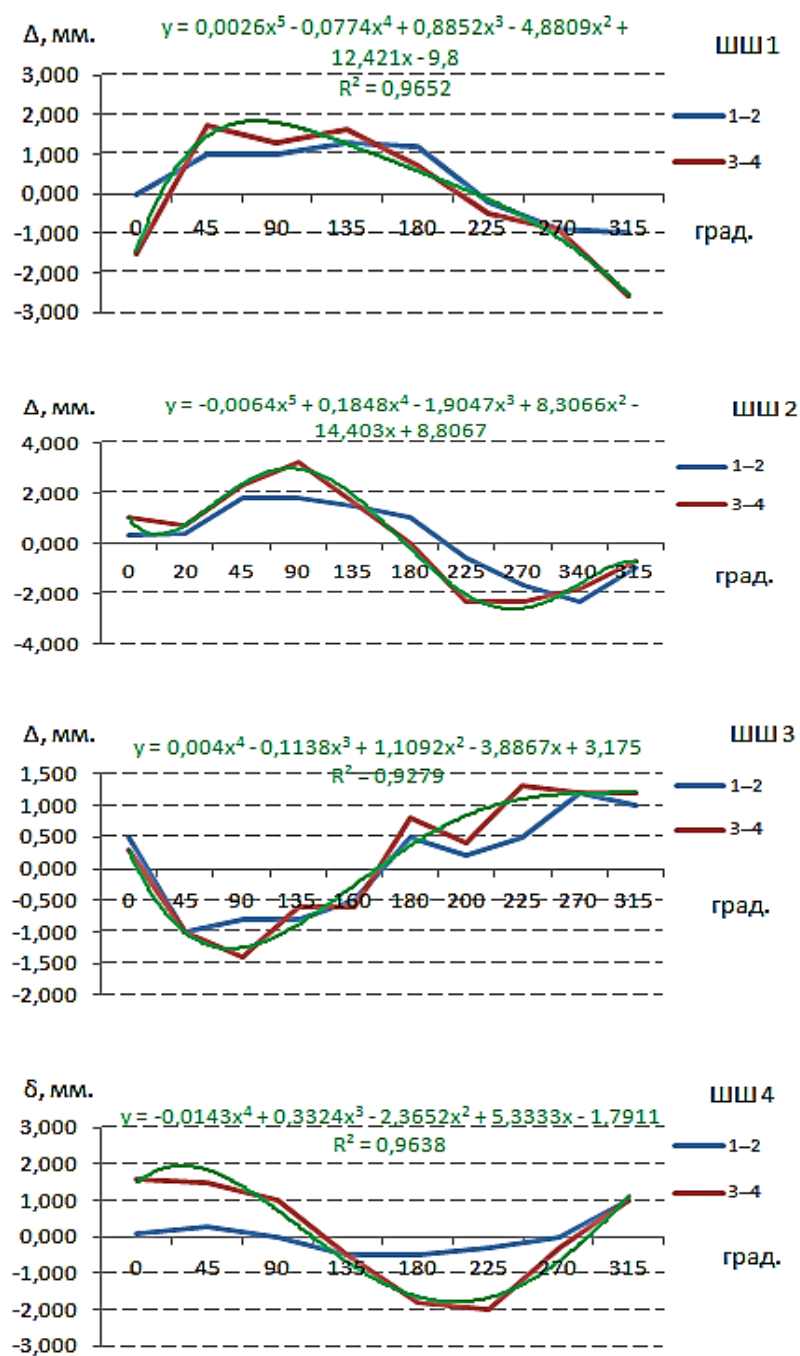


Рис. 6. Графики изменения отклонений профиля шатунных шеек от границы минимального припуска по угловым фазам: 1-2 – непрогретый штамп, уменьшение закрытой высоты штампа на 1 мм; 3-4 – прогретый штамп, уменьшение закрытой высоты штампа на 1 мм

Fig. 6. Graphs of changes in deviations of the profile of the connecting rod journals from the minimum allowance threshold for angular phases: 1-2 is an unheated die, reduction of the shut height of the die by 1 mm; 3-4 is a heated die, reduction of the shut height of the die by 1 mm

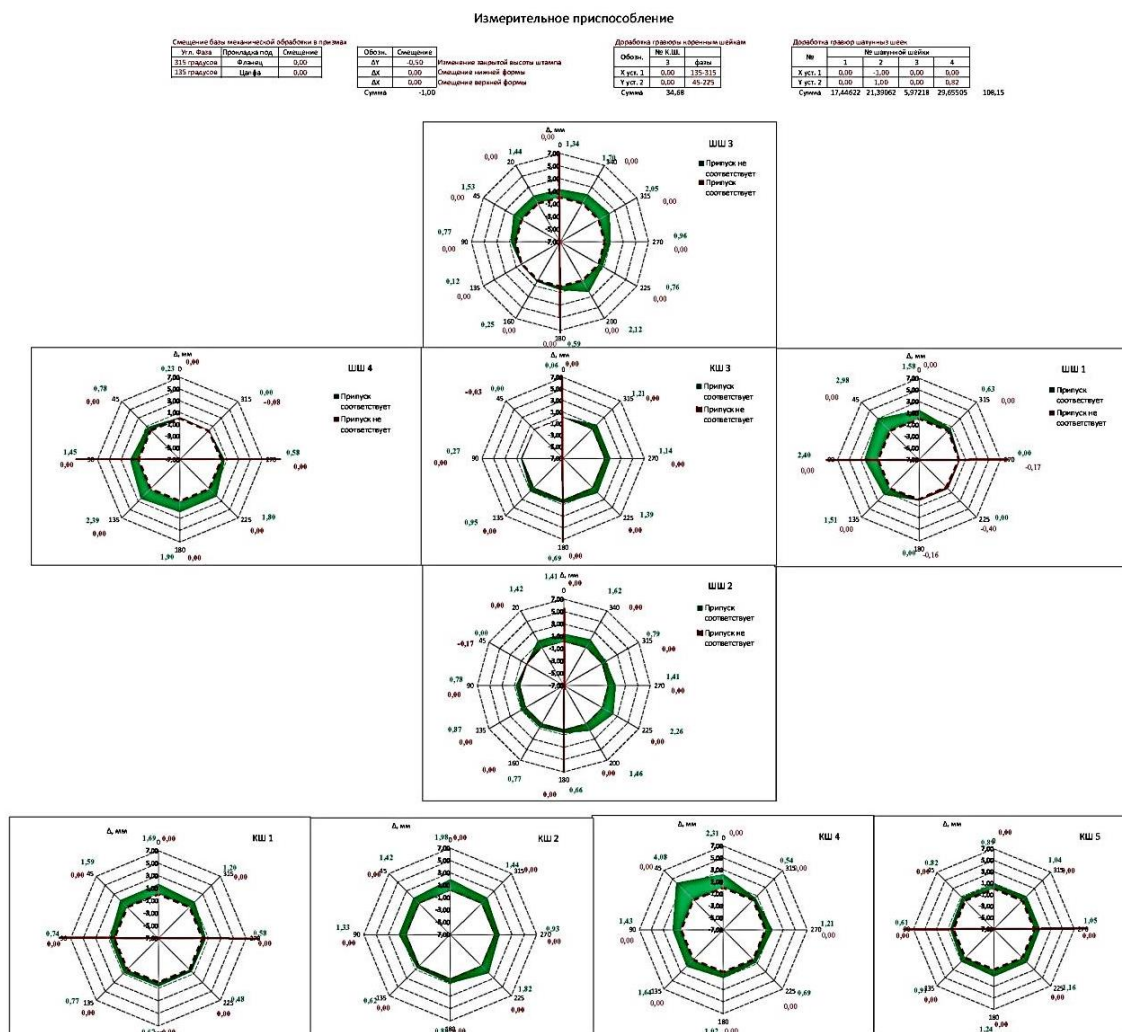


Рис. 7. Диаграммы распределения припуска по коренным и шатунным шейкам поковки коленчатого вала после подбора значений наладочных смещений

Fig. 7. Diagrams of the allowance distribution along the main and connecting rod journals of the crankshaft forging after selecting the values of the adjustment offsets

Заключение

Разработанная схема анализа наладочных смещений позволяет достаточно точно определить величину распределения припуска по коренным и шатунным шейкам поковки коленчатого вала в процессе подналадок главного ковочного пресса и другого штампового оборудования автоматической линии. Повышается точность наладочных смещений и, соответственно, качество изготовления и геометрическая точность поволовок коленчатых валов.

Список литературы

1. Володин И.М., Чех А.В., Володин А.И. Исследование формоизменения поковки при обрезке облоя // Проблемы и перспективы развития машиностроения: сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф., по-

священной 60-летию ЛГТУ. Липецк, 2016. С. 330–335.

2. Мартюгин А.В., Володин И.М. Снижение влияния деформации при обрезке облоя на геометрическую точность и дисбаланс поволовок коленчатых валов // Colloquium-journal. 2019. № 26-2 (50). С. 91–94.
3. Мартюгин А.В. Математическое исследование геометрической точности поковки при штамповке для обеспечения последующей балансировки коленчатого вала // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр. В 9-ти ч. / под ред. А.В. Гадюкиной. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. С. 52–56.
4. Мартюгин А.В. Технологическое обеспечение балансировки поволовок коленчатых валов большегрузного автомобиля // Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. Вып. 11. Ч. 1. С. 176–183.
5. Мартюгин А.В. Устранение дисбаланса коленчатых валов Р4 вне технологических линий производства // Будущее науки-2016: сб. науч. ст. 4-й Междунар.

- молодеж. науч. конф.: в 4-х т. / отв. ред. А.А. Горохов. Курск, 2016. С. 90–94.
6. Мартюгин А.В., Володин И.М. Анализ результатов исследования дисбаланса поковок коленчатых валов с использованием нейросети // *Colloquium-journal*. №26 (50). 2019. С. 89–94.
 7. Особенности проектирования технологических процессов горячей объемной штамповки с оригинальными требованиями к качеству поковок / Мартюгин А.В., Володин И.М., Володин А.И., Биктимирова Г.Ф. // *Современные наукоемкие технологии*. 2019. № 4. С. 41–49.
 8. Совершенствование метода проектирования технологических процессов горячей объемной штамповки коленчатых валов с необрабатываемыми противовесами / Мартюгин А.В., Володин И.М., Володин А.И., Биктимирова Г.Ф. // *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2020. Вып. 6. С. 364–371.
 9. Кузлагильдин Р.С., Шутова Л.А. Повышение стойкости штампов для горячего деформирования // *Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация*. 2019. № 1 (80). С. 50–58.
 10. Матыкова Е.А. Моделирование технологического процесса штамповки поковки «Коленчатый вал» в программном комплексе QForm 3D // *Наука и образование*. 2008. № 7. С. 5.
 11. Мышечкин А.А., Шумило Е.А., Босикашвили И.Г. Разработка и совершенствование процесса горячего формообразования поковки «Шестерня» моделированием в программе QForm // *Инновационные технологии в электронике и приборостроении: сб. докл. Российской науч.-техн. конф. с междунар. участием*. Москва, 2021. С. 155–159.
 12. Фомичев А.Ф., Панин С.Ю. Компьютерное исследование методов повышения качества поковок // *Металлообработка*. 2013. № 5–6 (77–78). С. 56–58.
 13. Хайруллин Р.А., Мартемьянова О.Н. Повышение стойкости кованых штампов для изготовления поковок коленчатого вала // *Современная наука: теоретический и практический взгляд: материалы I Международ. науч.-практ. конф.* Таганрог: ООО «НОУ «Вектор науки», 2014. С. 86–89.
 3. Martyugin A.V. Mathematical study on geometric accuracy of a forging during stamping to ensure subsequent balancing of the crankshaft. *Nauka. Tekhnologii. Innovatsii: sb. nauch. tr. v 9-ti ch.* [Science. Technologies. Innovations. Collection of scientific papers in 9 parts]. Edited by A.V. Gadyukina. Novosibirsk: NSTU, 2018, pp. 52–56. (In Russ.)
 4. Martyugin A.V. Technological support for balancing crankshaft forgings for heavy trucks. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of TulSU. Engineering Sciences], 2014, no. 11, part 1, pp. 176–183. (In Russ.)
 5. Martyugin A.V. Eliminating imbalance of crankshafts P4 outside the production lines. *Budushchee nauki-2016: sb. nauch. st. 4-oy Mezhdunar. molodezh. nauch. konf.: v 4-kh t.* [Future of Science-2016. Collection of scientific papers of the 4th International Youth Scientific Conference: in 4 volumes]. Edited by A.A. Gorokhov. Kursk, 2016, pp. 90–94. (In Russ.)
 6. Martyugin A.V., Volodin I.M. Analysis of the results of the study on imbalance of crankshaft forgings, using a neural network. *Colloquium-journal*, 2019, no. 26 (50), pp. 89–94. (In Russ.)
 7. Martyugin A.V., Volodin I.M., Volodin A.I., Biktimirova G.F. Design features of hot forging processes with original requirements for the quality of forgings. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern High Technologies], 2019, no. 4, pp. 41–49. (In Russ.)
 8. Martyugin A.V., Volodin I.M., Volodin A.I., Biktimirova G.F. Improving the method of designing hot forging processes for crankshafts with unprocessed counterweights. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of TulSU. Engineering Sciences], 2020, no. 6, pp. 364–371. (In Russ.)
 9. Kuzhagildin R.S., Shutova L.A. Increasing resistance of dies for hot deformation. *Sotsialno-ekonomicheskie i tekhnicheskie sistemy: issledovanie, proektirovanie, optimizatsiya* [Social, Economic and Technical Systems: Research, Design, Optimization], 2019, no. 1 (80), pp. 50–58. (In Russ.)
 10. Matykova E.A. Modeling a stamping process of crankshaft forging in QForm 3D software. *Nauka i obrazovanie* [Science and Education], 2008, no. 7, p. 5. (In Russ.)
 11. Myshechkin A.A., Shumilo E.A., Bosikashvili I.G. Development and improvement of the hot forming process of the gear forging by modeling in QForm software. *Innovatsionnye tekhnologii v elektronike i priborostroenii: sb. dokl. Rossiyskoy nauch.-tekhn. konf. s mezhdunar. uchastiem* [Innovative technologies in electronics and instrumentation. Collection of reports of the Russian Scientific and Technical Conference with an International Participation]. Moscow, 2021, pp. 155–159. (In Russ.)
 12. Fomichev A.F., Panin S.Yu. Computer research of methods for improving the quality of forgings. *Metalloobrabotka* [Metalworking], 2013, no. 5-6 (77-78), pp. 56–58. (In Russ.)

References

1. Volodin I.M., Chekh A.V., Volodin A.I. The study on the shape change of a forging, when removing the flash. *Problemy i perspektivy razvitiya mashinostroeniya: sb. nauch. tr. mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., posvyashchennoy 60-letiyu LGTU* [Problems and prospects of the development of mechanical engineering. Collection of scientific papers of the international scientific and technical conference dedicated to the 60th anniversary of LSTU]. Lipetsk, 2016, pp. 330–335. (In Russ.)
2. Martyugin A.V., Volodin I.M. Reducing the effect of deformation during flash trimming on geometric accuracy and imbalance of crankshaft forgings. *Colloquium-journal*, 2019, no. 26-2 (50), pp. 91–94. (In Russ.)

13. Khairullin R.A., Martemyanova O.N. Increasing durability of forging dies to manufacture crankshaft bearings. *Sovremennaya nauka: teoreticheskiy i prakticheskiy vzglyad: materialy I Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Modern Science: Theoretical and Practi-

cal Outlook: Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference]. Taganrog: LLC Non-State Educational Institution Vector of Science, 2014, pp. 86–89. (In Russ.)

Поступила 28.12.2021; принята к публикации 28.01.2022; опубликована 25.03.2022
Submitted 28/12/2021; revised 28/01/2022; published 25/03/2022

Сафаров Дамир Тамасович – кандидат технических наук, доцент,
Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета,
Набережные Челны, Россия.
Email: safarov-dt@mail.ru. ORCID 0000-0002-8297-4524

Чех Александр Васильевич – директор,
Кузнечный завод ПАО «Камский автомобильный завод», Набережные Челны, Россия.
Email: ChehAV@kamaz.ru

Damir T. Safarov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Naberezhnye Chelny Institute (branch) of Kazan (Volga Region) Federal University, Naberezhnye Chelny, Russia.
Email: safarov-dt@mail.ru. ORCID 0000-0002-8297-4524

Alexander V. Chekh – Director,
Forging Plant of PJSC Kama Automobile Plant, Naberezhnye Chelny, Russia.
Email: ChehAV@kamaz.ru

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
 УДК 621.92
 DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-1-95-104



МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГЛУБИНЫ РЕЗАНИЯ В РАЗНЫХ СЕЧЕНИЯХ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ЦИФРОВОМ ДВОЙНИКЕ ОПЕРАЦИИ КРУГЛОГО ВРЕЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ С ЧПУ

Акинцева А.В., Переверзев П.П.

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Прогнозирование точности на операциях круглого шлифования с ЧПУ является сложной и до сих пор полностью не решенной задачей. Актуальность задачи обуславливается отсутствием у различных производителей цифрового инструмента, позволяющего контролировать управляющие программы на возможность обеспечения заданной точности обработки. Для решения данной задачи предложено использовать цифровой двойник операции круглого шлифования, который описывает процесс формообразования поверхности. Целью работы является разработка модели расчета глубины резания, которая позволит рассчитывать глубину резания в разных сечениях обрабатываемой поверхности при круглом врезном шлифовании вала с переменной подаемостью по всей длине шлифования. Модель расчета глубины резания в разных сечениях представляет собой «цифровой двойник» процесса шлифования, который симулирует процесс съема слоя металла переменной толщины одновременно по всей длине шлифуемой поверхности на каждом обороте заготовки с учетом переменной подаваемости технологической системы. В результате становится возможным расчет текущих значений размеров шлифуемой поверхности, по которым можно рассчитать погрешность обработки диаметральных размеров, формы и взаимного расположения поверхностей. Для разработки модели использованы методы имитационного моделирования, аналитические методы математического моделирования, базирующиеся на фундаментальных физических законах и основных положениях механики резания и теории пластической деформации металла в зоне стружкообразования. Научная новизна приведенных в данной статье исследований заключается в разработке цифрового двойника формообразования обрабатываемой поверхности, который впервые устанавливает взаимосвязь между глубиной резания, режимами резания, упругими деформациями, силами резания и т.д. с точностью обработки. Представленную в данной статье модель расчета глубины резания возможно использовать не только для прогнозирования точности обработки в системе контроля управляющей программы ЧПУ, но и для оптимизации режимов резания проектируемой операции. Это обуславливает большую практическую значимость полученных результатов в производстве.

Ключевые слова: круглое шлифование, цифровой двойник, модель глубины резания, жесткость технологической системы, погрешность обработки.

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

© Акинцева А.В., Переверзев П.П., 2022

Для цитирования

Акинцева А.В., Переверзев П.П. Моделирование изменения глубины резания в разных сечениях обрабатываемой поверхности в цифровом двойнике операции круглого врезного шлифования с ЧПУ // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №1. С. 95–104. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-1-95-104>



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

MODELING THE CUTTING DEPTH CHANGE IN DIFFERENT SECTIONS OF THE PROCESSED SURFACE IN THE DIGITAL TWIN OF THE CIRCULAR PLUNGE CNC GRINDING OPERATION

Akintseva A.V., Pereverzev P.P.

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Predicting accuracy on circular CNC grinding operations is a challenging task, which has still not been completely solved. Relevance of the task is determined by the lack of a digital tool at various manufacturers to monitor control programs for ensuring the set processing accuracy. To accomplish this task, it is proposed to use a digital twin of the circular grinding operation, which describes the process of surface shaping. The objective of the research is to develop a model for calculating the cutting depth in different sections of the processed surface at a circular plunge grinding of the shaft with variable ease along the entire grinding length. The model for calculating the cutting depth in different sections is a «digital twin» of the grinding process, which simulates the process of removing a metal layer of variable thickness simultaneously along the entire length of the grinded surface on each revolution of the workpiece, considering the variable ease of the technological system. As a result, it becomes possible to calculate the current values of the grinded surface dimensions used to calculate the processing error of diametrical dimensions, shape and relative location of surfaces. To develop the model, the authors used simulation modeling methods with applying analytical methods of mathematical modeling based on the fundamental physical laws and fundamentals of cutting mechanics and the theory of metal flow in the chip formation zone. Scientific novelty of the studies presented in this article lies in the development of a digital twin of the processed surface shaping, which for the first time establishes the interrelation between the cutting depth, cutting modes, elastic deformations, cutting forces, etc. and processing accuracy. The model for calculating the cutting depth, presented in this paper, can be used not only to predict processing accuracy in the monitoring system of the CNC control program, but also to optimize the cutting modes of the designed operation. This determines great practical relevance of the obtained results in manufacturing.

Keywords: circular grinding, digital twin, cutting depth model, rigidity of the technological system, processing error.

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

For citation

Akintseva A.V., Pereverzev P.P. Modeling the Cutting Depth Change in Different Sections of the Processed Surface in the Digital Twin of the Circular Plunge CNC Grinding Operation. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 1, pp. 95–104. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-1-95-104>

Введение

Прогнозирование точности обработки на операциях круглого шлифования с ЧПУ, в которых программные подачи изменяются в автоматическом ступенчатом цикле, является сложной и до сих пор полностью не решенной научной задачей. Точность обработки прогнозируется по расчетным размерам радиусов прошлифованной поверхности детали, которая сформирована в результате многократного съема слоя металла на каждом обороте заготовки в течение всего цикла шлифования. Поэтому необходима модель расчета многократного съема слоя металла на каждом обороте заготовки в течение всего цикла шлифования. Цикл шлифования представляет собой ступенчатое изменение режимов резания в

зависимости от оставшейся части припуска. Применение цикла позволяет использовать весь диапазон режимов резания и сочетать при обработке заготовки различные стадии (черновую, получистовую и чистовую).

Известные на данный момент научные исследования в области прогнозирования точности обработки в области шлифования по большей части направлены на моделирование получаемого микрорельефа и волнистости обрабатываемой поверхности – шероховатости [1–8]. В работах [9–12] рассмотрено прогнозирование точности при шлифовании, но в данных работах нет учета силы резания, упругих деформаций технологической системы и влияния переменных технологических условий (колебание припуска в партии детали, степени затупления круга и т.д.) на точность об-

работки. По сути, происходит прогнозирование точности при обработке в идеальных условиях.

Важнейшим фактором, напрямую влияющим на точность обработки, является переменная податливость технологической системы (ТС) по длине обрабатываемой поверхности. Из-за переменной податливости ТС, под действием силы резания происходит неравномерный прогиб участков вала относительно режущего инструмента, что обуславливает разную глубину резания, а значит, разные значения радиусов и погрешность размеров, формы и расположения всей обработанной поверхности вала. Учитывая ступенчатое изменение программной подачи и нелинейное изменение фактической подачи и силы резания по длине обрабатываемой поверхности из-за переменной податливости ТС, можно сделать вывод, что глубина резания тоже будет изменяться по длине обработки на каждом обороте заготовки.

Для расчета параметров формообразования шлифуемой поверхности и прогнозирования точности обработки необходима модель одновременного расчета переменной глубины резания на всех участках обрабатываемой поверхности на каждом обороте заготовки, в зависимости от податливости каждого участка вала по всей длине шлифования. Совокупность переменных глубин резания по всей длине шлифования образует слой снимаемого металла в каждый момент времени.

Модель расчета глубины резания в разных сечениях представляет собой «цифровой двойник» процесса шлифования, который симулирует процесс съема слоя металла переменной толщины (толщина слоя равна глубине резания) одновременно по всей длине шлифуемой поверхности на каждом обороте заготовки с учетом переменной податливости ТС и переменной глубины резания (равной толщине слоя) по всей длине обрабатываемой поверхности при заданных условиях шлифования.

Цифровой двойник позволяет проводить расчет текущих значений параметров формообразования поверхности, описывающих текущие значения размеров шлифуемой поверхности в течение всего цикла шлифования, и прогнозировать размеры обработанной поверхности вала в конце цикла шлифования путем суммирования толщин слоев съема металла в разных сечениях по длине обрабатываемой поверхности. Результатом такого моделирования являются расчетные значения колебания радиусов обработанной поверхности вала в разных сечениях вала по длине обработки, по ко-

торым можно рассчитать погрешность обработки.

Таким образом, решение задачи прогнозирования точности обработки возможно при помощи цифрового двойника операции круглого врезного шлифования с ЧПУ, созданного на основе системного моделирования множества взаимосвязанных широкодиапазонных аналитических моделей процессов в единую модель расчета значений фактических подач, силы резания и точности обработки с учетом основных технологических факторов.

Полученные результаты и их обсуждение

Рассмотрим взаимосвязь глубины резания $\Delta t_{\phi, n}$ в разных сечениях (условно обозначим С1, С2, С3, С4, С5) обрабатываемой поверхности вала с упругими деформациями $y_{c, n}$ в каждом сечении s и на каждом обороте заготовки n . Для начала рассмотрим модель процесса шлифования на первом обороте заготовки (**рис. 1**, $n = 1$).

На **рис. 1** показан гибридный график, совмещающий графики подач $t_{П, n}$, $\Delta t_{П, z}$, $\Delta t_{\phi, n}$, упругих перемещений $y_{c, n}$ и на первом обороте $n = 1$ заготовки радиусов заготовки $R_{c, n}$ в поперечных сечениях, равномерно распределенных по длине обрабатываемой поверхности В. При построении расчетной схемы ось заготовки принята неподвижной, а упругие перемещения технологической системы (ТС) относительно оси заготовки совершает шлифовальный круг. Поэтому режущая кромка и ось шлифовального круга не параллельны оси заготовки, а из-за переменной податливости ТС по длине вала расположены под некоторым углом.

На **рис. 1** по оси ординат отложены значения программной и фактической подач, а по оси абсцисс – длина шлифуемой поверхности. За время первого оборота заготовки при $n = 1$ режущая кромка круга подается на величину программной радиальной подачи за оборот $\Delta t_{П, z}$, мм/об, на z -й ступени цикла при $z = 1$. Но из-за упругой деформации ТС в процессе шлифования режущая кромка круга сдвигается на графике вниз на величину упругой деформации $y_{c, n}$, мм. Поскольку податливость ТС по длине обрабатываемой поверхности имеет переменные значения, то ось заготовки относительно режущей кромки круга сдвигается неравномерно, в зависимости от величины податливости в поперечных сечениях вала.

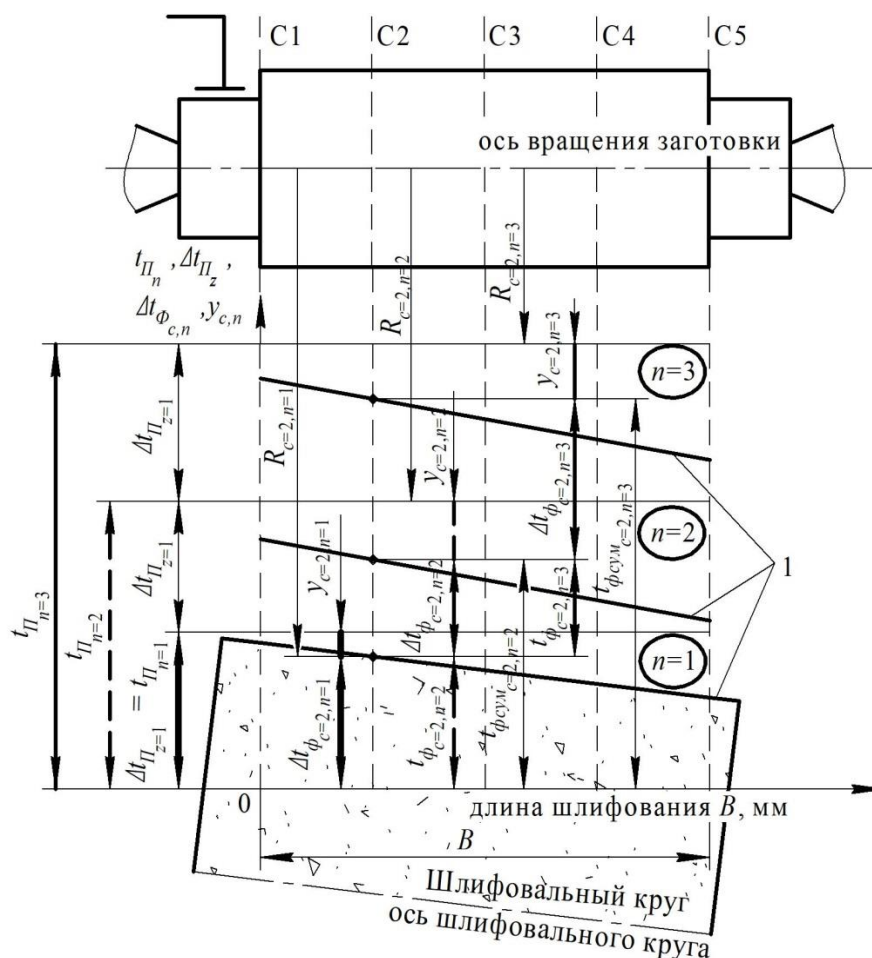


Рис. 1. Расчетная схема взаимосвязи программной и фактической подач с упругими деформациями и радиусами в разных сечениях обрабатываемой поверхности на первом, втором и третьем оборотах заготовки:

1 – траектория радиусов по длине обрабатываемой поверхности на n -м обороте заготовки

Fig. 1. Calculation model of the interrelation between program and actual feeds and elastic deformations and radii in different sections of the processed surface on the first, second and third revolutions of the workpiece:

1 is a trajectory of radii along the length of the processed surface on the n -th revolution of the workpiece

В сечении правого торца податливость больше, чем в сечении левого торца, и упругие деформации в сечении правого торца больше, чем в левом. Поэтому режущая кромка круга показана под углом как результат неодинаковых деформаций ТС. В результате глубина резания, то есть фактическая скорость подачи $\Delta t_{Фc,n}$, мм/об, будет меньше, чем программная $\Delta t_{Пz}$. На графике на рис. 1 показаны величины $\Delta t_{Фc=2,n=2}$ и $y_{c=2,n=1}$ для сечения C2 и $n = 1$. Из графика видно, что сумма фактической подачи $\Delta t_{Фc,n}$ и упругой деформации $y_{c,n}$ равны программной подаче $\Delta t_{Пz}$ за оборот заготовки, то есть уравнение баланса подач и упругих деформаций за оборот заготовки можно записать в следующем виде:

$$\Delta t_{Пz} = \Delta t_{Фc,n} + y_{c,n}, \quad (1)$$

$$y_{c,n} = \gamma_c P_{y_n}, \quad (2)$$

где $\Delta t_{Пz}$ – программная радиальная подача, мм/об; $\Delta t_{Фc,n}$ – фактическая радиальная подача, мм/об; $y_{c,n}$ – упругая деформация технологической системы, мм; P_{y_n} – радиальная составляющая силы резания на n -м обороте заготовки; γ_c – податливость ТС в заданном сечении вала.

Отметим, что переменные $\Delta t_{Пz}$ и $\Delta t_{Фc,n}$ являются скоростями подач за один оборот заготовки. Показанная на графике подача $t_{Пn}$, мм – это программная подача (накопленная) за несколько n оборотов заготовки, рассчитывается по формуле

$$t_{\Pi_n} = \sum_{z=1}^Z \sum_{n=1}^N \Delta t_{\Pi_z}, \quad (3)$$

где z – порядковый номер ступени цикла; Z – максимальное количество ступеней в цикле; n – порядковый номер оборота заготовки на z -й ступени цикла; N – максимальное количество оборотов заготовки на z -й ступени цикла.

С учетом уравнения (3) уравнение баланса технологических перемещений для первого оборота заготовки при $n = 1$ запишем следующим образом (на **рис. 1** размерная цепочка (баланс) выделена утолщённой линией):

$$t_{\Pi_{n=1}} = \Delta t_{\Pi_{z=1}} = \Delta t_{\Phi_{c,n=1}} + y_{c,n=1}. \quad (4)$$

Из уравнения (4) выразим искомую глубину резания $\Delta t_{\Phi_{c,n=1}}$ в сечении C при $n = 1$:

$$\Delta t_{\Phi_{c,n=1}} = t_{\Pi_{n=1}} - y_{c,n=1}. \quad (5)$$

Текущее значение радиуса заготовки $R_{c,n=1}$ можно рассчитать как разницу между исходным радиусом заготовки $R_{\text{заг max}}$ и глубиной резания $\Delta t_{\Phi_{c,n}}$ (см. **рис. 1**), то есть

$$R_{c,n=1} = R_{\text{заг max}} - \Delta t_{\Phi_{c,n}}, \quad (6)$$

где $R_{c,n=1}$ – текущее значение радиуса заготовки.

Рассмотрим взаимосвязь глубины резания $\Delta t_{\Phi_{c,n=2}}$ в разных сечениях обрабатываемой поверхности вала с упругими деформациями $y_{c,n=2}$ на втором обороте заготовки при $n = 2$. Уравнение баланса технологических перемещений для второго оборота заготовки при $n = 2$ запишем следующим образом (на **рис. 1** размерная цепочка (баланс) выделена утолщённой прерывистой линией):

$$\begin{aligned} t_{\Pi_{n=2}} &= \Delta t_{\Pi_{z=1}} + \Delta t_{\Pi_{z=2}} = \\ &= \Delta t_{\Phi_{c,n=2}} + y_{c,n=2} + t_{\Phi_{c,n=2}}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $t_{\Phi_{c=2,n}}$ – часть припуска (на радиус), снятого за предыдущие $(n-1)$ обороты заготовки, мм,

$$t_{\Phi_{c=2,n}} = \sum_{n=1}^N t_{\Phi_{c=2,n}}. \quad (8)$$

На первом обороте заготовки при $n = 1$ значение $t_{\Phi_{c,n=1}=0}$, так как предыдущего оборота при

$n = 0$ не было и глубина резания на предыдущем обороте равна нулю $\Delta t_{\Phi_{c,n=0}} = 0$. На втором обороте заготовки при $n = 2$, величина $t_{\Phi_{c,n=2}}$ равна глубине резания $\Delta t_{\Phi_{c,n=1}}$ на предыдущем обороте при $n = 1$, то есть $t_{\Phi_{c,n=2}} = \Delta t_{\Phi_{c,n=1}}$.

Из уравнения (7) выразим глубину резания $\Delta t_{\Phi_{c,n=2}}$ в сечении C при $n = 2$ (при $t_{\Phi_{c,n=2}} = \Delta t_{\Phi_{c,n=1}}$):

$$\Delta t_{\Phi_{c,n=2}} = t_{\Pi_{n=2}} - y_{c,n=2} - t_{\Phi_{c,n=2}}. \quad (9)$$

Текущее значение радиуса $R_{c,n=2}$ заготовки можно рассчитать как разницу между исходным радиусом заготовки $R_{\text{заг max}}$ и суммой глубин резания на первых двух оборотах заготовки $\Delta t_{\Phi_{c,n=1}}$ и $\Delta t_{\Phi_{c,n=2}}$ (см. **рис. 1**), то есть

$$\begin{aligned} R_{c,n=2} &= R_{\text{заг max}} - \Delta t_{\Phi_{c,n=1}} - \Delta t_{\Phi_{c,n=2}} = \\ &= R_{\text{заг max}} - t_{\Phi_{c,n=2}} - \Delta t_{\Phi_{c,n=2}}. \end{aligned} \quad (10)$$

Величина снятой части припуска $t_{\Phi_{\text{сум } c,n=2}}$, мм, за два оборота заготовки рассчитывается как сумма глубин резания $\Delta t_{\Phi_{c,n}}$ на всех оборотах заготовки по формуле

$$t_{\Phi_{\text{сум } c,n=2}} = \sum_{n=1}^{n=2} t_{\Phi_{c,n}} = \Delta t_{\Phi_{c,n=1}} + t_{\Phi_{c,n=2}}. \quad (11)$$

Соответственно, на первом обороте заготовки

$$t_{\Phi_{\text{сум } c,n=1}} = \Delta t_{\Phi_{c,n=1}}. \quad (12)$$

Текущее значение радиуса $R_{c,n}$ заготовки можно рассчитать как разницу между исходным радиусом заготовки $R_{\text{заг max}}$ и суммой глубин резания $t_{\Phi_{\text{сум } c,n}}$ (см. **рис. 1**), то есть

$$R_{c,n} = R_{\text{заг max}} - t_{\Phi_{\text{сум } c,n=2}}. \quad (13)$$

Аналогично получим уравнения взаимосвязи подач, упругих деформаций и радиусов заготовки в процессе круглого врезного шлифования за три оборота заготовки при $n = 3$. Накопленная программная подача равна трем программным подачам за оборот, то есть уравнение баланса подач и упругих деформаций можно записать в следующем виде (на **рис. 1** размерная цепочка (баланс) выделена сплошной линией):

$$t_{\Pi_{n=3}} = 3\Delta t_{\Pi_Z} = \Delta t_{\Phi_{c,n=3}} + y_{c,n=3} + t_{\Phi_{c,n=3}}, \quad (14)$$

$$t_{\Phi_{c,n=3}} = \Delta t_{\Phi_{c,n=1}} + \Delta t_{\Phi_{c,n=2}}. \quad (15)$$

Из уравнения (14) получим значение глубины резания:

$$t_{\Phi_{c,n=3}} = t_{\Pi_{n=3}} - y_{c,n=3} - t_{\Phi_{c,n=3}}. \quad (16)$$

Величина снятой части припуска $t_{\Phi_{c,сум_{c,n}}}$ за три оборота заготовки рассчитывается как сумма предыдущих глубин резания $\Delta t_{\Phi_{c,n}}$ на всех оборотах заготовки по формуле

$$\begin{aligned} t_{\Phi_{c,сум_{c,n=3}}} &= \sum_{i=1}^{n=3} \Delta t_{\Phi_{c,n}} = \\ &= \Delta t_{\Phi_{c,n=1}} + \Delta t_{\Phi_{c,n=2}} + \Delta t_{\Phi_{c,n=3}}. \end{aligned} \quad (17)$$

Текущее значение радиуса $R_{c,n=3}$ заготовки можно рассчитать как разницу между исходным радиусом заготовки $R_{заг_{max}}$ и суммой глубин резания $t_{\Phi_{c,сум_{c,n=3}}}$ (см. **рис. 1**), то есть

$$R_{c,n} = R_{заг_{max}} - t_{\Phi_{c,сум_{c,n=3}}}. \quad (18)$$

Таким образом, формулу глубины резания при круглом врезном шлифовании вала с переменной податливостью в заданном сечении и обороте заготовки n можно записать в следующем виде:

$$\Delta t_{\Phi_{c,n}} = t_{\Pi_n} - y_{c,n} - t_{\Phi_{c,n}}, \quad (19)$$

в которой $t_{\Phi_{c,n=1}} = 0$ при $n = 1$.

Раскроем значение $y_{c,n}$ путем подстановки формулы (2), получим

$$\Delta t_{\Phi_{c,n}} = t_{\Pi_n} - \gamma_c P_{y_n} - t_{\Phi_{c,n}}. \quad (20)$$

Формула (20) представляет собой математическую модель расчета текущего значения глубины резания (фактической скорости подачи) $\Delta t_{\Phi_{c,n}}$ на каждом обороте n заготовки, при известном значении значение общей радиальной силы резания P_{y_n} и величин податливости γ_c в каждом сечении C вала.

Однако расчет по формуле (20) глубин резания $\Delta t_{\Phi_{c,n}}$ в разных сечениях вала невозможно,

так как неизвестно значение общей радиальной силы резания P_{y_n} , которая представляет собой сумму сил резания на всех участках вала по длине обрабатываемой поверхности.

Для установления взаимосвязи общей радиальной силы резания P_{y_n} с податливостью ТС разобьем обрабатываемую поверхность вала на элементарные участки длиной B_i . На **рис. 2** показана обрабатываемая поверхность вала, разбитая на четыре участка, расположенных между пятью сечениями C1-C5. Соответственно, обозначим номер каждого участка как $i = 1$, $i = 2$, $i = 3$ и $i = 4$.

При известных значениях податливости γ_c сечений вала можно определить податливость γ_i каждого элементарного участка вала как среднее арифметическое податливости сечений, между которыми расположен участок. Тогда упругую деформацию $y_{i,n}$ участка вала на n -м обороте заготовки в процессе шлифования можно записать как

$$y_{i,n} = \gamma_i P_{y_n}, \quad (21)$$

где γ_i – податливость i -го элементарного участка вала, мм.

Соответственно, глубину резания на каждом участке обозначим через $\Delta t_{\Phi_{i,n}}$, а величину снятой части припуска за предыдущие обороты заготовки обозначим через $t_{\Phi_{i,n}}$.

Тогда баланс технологических перемещений для каждого участка с учетом его ширины B_i (см. **рис. 2**) можно записать в следующем виде:

$$t_{\Pi_n} B_i = (\Delta t_{\Phi_{i,n}} + y_{i,n} + t_{\Phi_{i,n}}) B_i. \quad (22)$$

Учитывая, что участки вала не могут перемещаться независимо друг от друга, баланс совместных технологических перемещений запишем как равенство площадей перемещений по длине обрабатываемой поверхности:

$$t_{\Pi_n} B = B_i \sum_{i=1}^I (\Delta t_{\Phi_{i,n}} + \gamma_i P_{y_n} + t_{\Phi_{i,n}}), \quad (23)$$

где i – порядковый номер участка на обрабатываемой поверхности (I – максимальное количество участков на обрабатываемой поверхности вала).

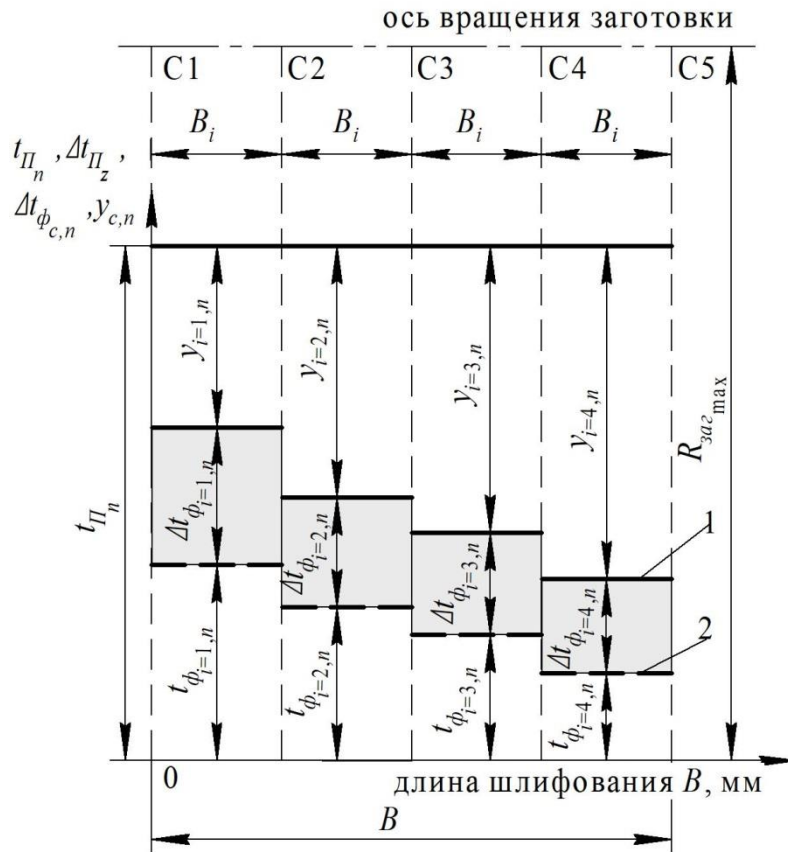


Рис. 2. Расчетная схема взаимосвязи программной и фактической подач с упругими деформациями и радиусами в разных сечениях обрабатываемой поверхности при переменной податливости ТС по длине обрабатываемой поверхности: 1 – траектория радиусов по длине B обрабатываемой поверхности на последнем обороте заготовки; 2 – траектория радиусов по длине B обрабатываемой поверхности на предыдущем обороте заготовки

Fig. 2. Calculation model of the interrelation between program and actual feeds and elastic deformations and radii in different sections of the processed surface at variable ease of the technological system along the length of the processed surface: 1 is a trajectory of radii along length B of the processed surface on the last revolution of the workpiece; 2 is a trajectory of radii along length B of the processed surface on the previous revolution of the workpiece

Количество участков вала можно рассчитать по формуле

$$I = \frac{B}{B_i} \quad (24)$$

После подстановки формулы (24) в уравнение (23) и проведения соответствующих преобразований получим

$$t_{Пн} = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \Delta t_{\phi_{i,n}} + \gamma_i P_{y_n} + t_{\phi_{i,n}}, \quad (25)$$

$$t_{Пн} = P_{y_n} \frac{\sum_{i=1}^I \gamma_i}{I} + \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \Delta t_{\phi_{i,n}} + \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I t_{\phi_{i,n}}, \quad (26)$$

Поделим на количество участков I все слагаемые в уравнении (26), получим

$$t_{Пн} = \gamma_m + \Delta t_{\phi_{m_n}} + t_{\phi_{m_n}}, \quad (27)$$

где γ_m – средняя податливость ТС на длине шлифования B , мм; $\Delta t_{\phi_{m_n}}$ – средняя глубина резания на длине шлифования B , мм; $t_{\phi_{m_n}}$ – среднее значение снятой части припуска за предыдущие обороты заготовки на длине шлифования B .

Учитывая, что среднее значение упругой деформации γ_{m_n} равно

$$\gamma_{m_n} = \gamma_m P_{y_n}, \quad (28)$$

уравнение (27) запишем в виде

$$t_{Пн} = \gamma_{m_n} + \Delta t_{\phi_{m_n}} + t_{\phi_{m_n}}, \quad (29)$$

Таким образом, формулы (27)-(29) устанавливают баланс технологических перемещений при

общей силе резания P_{y_n} и средней податливости γ_m ТС, включая среднюю упругую деформацию y_{m_n} и среднюю глубину резания $\Delta t_{\phi m_n}$ на каждом обороте заготовки в цикле шлифования.

Для нахождения суммарной силы резания P_{y_n} в цикле шлифования воспользуемся полученной ранее и доказанной экспериментально формулой [13]:

$$P_{y_n} = K_3 \Delta t_{\phi m_n} + K_4 \sqrt{\Delta t_{\phi m_n}}, \quad (30)$$

$$K_3 = \pi d B n \frac{\sigma_i \varepsilon_i \tan \beta}{V_k}, \quad (31)$$

$$K_4 = \eta B \frac{\sigma_i}{3} \sqrt{\frac{dD}{D+d}}, \quad (32)$$

где σ_i – интенсивность напряжений в движущемся объеме металла, характеризующая сопротивление металла пластической деформации при степени, скорости деформации и температуре, присущих процессу шлифования; ε_{ci} – интенсивность скорости деформации объема металла в зоне сдвига, 1/с; η – степень затупления шлифовального круга, равная отношению опорной поверхности круга по площадкам затупления зерен; d – диаметр обрабатываемой поверхности заготовки, мм; D – диаметр заготовки, мм; B – длина обрабатываемой поверхности заготовки, мм; n – частота вращения заготовки, мм/мин; $\Delta t_{\phi m_n}$ – скорость фактической подачи в заданном сечении вала на n -м обороте заготовки, мм/об; V_k – скорость вращения круга, м/с.

Фактическая накопленная подача за предыдущие обороты заготовки $t_{\phi m_n}$ тоже одинакова во всех сечениях вала и рассчитывается на n -м обороте заготовки по формуле (33) как сумма глубин резания за предыдущие обороты заготовки или как часть припуска (на радиус), снятого за предыдущие ($n-1$) обороты заготовки:

$$t_{\phi m_n} = \sum_{n=1}^N \Delta t_{\phi m_n}, \quad (33)$$

Решим уравнение (29) относительно $\Delta t_{\phi m_n}$ совместно с (30)-(33), получим:

$$\Delta t_{\phi m_n} = \left[\frac{-\gamma_m K_4}{2(1 + K_3 \gamma_m)} + \sqrt{\left[\frac{\gamma_m K_4}{2(1 + K_3 \gamma_m)} \right]^2 + \frac{t_{\Pi_n} - t_{\phi m_n}}{1 + K_3 \gamma_m}} \right]^2. \quad (34)$$

Формула (34) представляет собой математическую модель расчета скорости средней фактической подачи (глубины резания) $\Delta t_{\phi m_n}$ в течение всего автоматического цикла круглого врезного шлифования с ЧПУ на каждом n -м обороте заготовки при средней податливости ТС, в зависимости от основных технологических факторов.

Расчет текущих значений глубины резания $\Delta t_{\phi m_n}$ ведется в течение всего цикла шлифования в разных поперечных сечениях вала по длине обрабатываемой поверхности с различной податливостью и при разных углах поворота радиусов профиля заготовки, имеющей исходное радиальное биение. Текущие значения радиусов обрабатываемой поверхности рассчитываются путем уменьшения исходного радиуса заготовки на величину глубины резания. Погрешность обработки в конце цикла шлифования рассчитывается по разбросу значений радиусов обработанной поверхности в разных сечениях и углах поворота радиусов обрабатываемой поверхности. Таким образом, решена задача моделирования формообразования технологического размера и его погрешности в цифровом двойнике операции круглого врезного шлифования с ЧПУ. Подобный подход является типовым при разработке цифрового двойника для других видов шлифования.

Заключение

1. Прогнозирование точности на операциях круглого шлифования с ЧПУ является сложной и до сих пор нерешенной задачей. Сложность данной задачи обусловлена наличием множества взаимосвязей между параметрами процесса резания, вызывающего теплофизические изменения, упругие деформации технологической системы и т.д. Важнейшим фактором, напрямую влияющим на точность обработки, является переменная податливость технологической системы по длине обрабатываемой поверхности. Из-за переменной податливости ТС под действием силы резания происходит неравномерный прогиб участков вала относительно шлифовального круга. Это обуславливает разную глубину резания, а

значит, разные значения радиусов и погрешность размеров, формы и расположения всей обработанной поверхности вала.

2. Для решения задачи прогнозирования точности обработки разработан «цифровой двойник» процесса шлифования, который симулирует процесс съема слоя металла переменной толщины одновременно по всей длине шлифуемой поверхности на каждом обороте заготовки с учетом переменной податливости ТС. Основу цифрового двойника составляет аналитическая модель расчета глубины резания, которая позволяет рассчитывать глубину резания в разных сечениях обрабатываемой поверхности при круглом врезном шлифовании вала с переменной податливостью по всей длине шлифования. Разработанная методика расчета текущих значений размеров шлифуемой поверхности за время съема припуска и ступенчатом изменении подачи позволяет прогнозировать погрешность обработки диаметральных размеров вала с переменной податливостью, отклонения формы и взаимного расположения поверхностей.

3. Прогнозирование точности обработки на основе модели расчета глубины в разных сечениях обрабатываемой поверхности в цифровом двойнике можно использовать для контроля вновь спроектированных управляющих программ для станков с ЧПУ [14] и в системе оптимизации режимов резания проектируемой операции [15].

Список литературы

1. Gong Y.D., Wang B., Wang W.S. The simulation of grinding wheels and ground surface roughness based on virtual reality technology // *Journal of Materials Processing Technology*. 2002. Vol. 129. Pp. 123–126.
2. Hecker R., Liang S.Y. Predictive modeling of surface roughness in grinding // *I. J. of Machine Tools and Manufacture*. 2003. Vol. 43(8). Pp. 755–761.
3. Zhou X., Xi F. Modeling and predicting surface roughness of the grinding process // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2002. Vol. 42. Pp. 969–977.
4. Kumar S., Paul S. Numerical modelling of ground surface topography: effect of traverse and helical superabrasive grinding with touch dressing // *Production Engineering*. 2012. Vol. 6 (2). Pp. 199–204.
5. Широков А.В., Осипов А.П. К вопросу о прогнозировании и обеспечении параметров шероховатости шлифованной поверхности // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2007. №6. С. 76–88.

6. Воронов С.А., Вэйдун Ма, Воронова И.С. Стохастическая модель процесса абразивной обработки. Кинематика плоского шлифования // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2017. №11. С. 68–78.
7. Козлов А.М., Ефремов В.В. Формирование микро-рельефа при обработке абразивным инструментом // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2004. №1. С. 59–64.
8. Новоселов Ю.К., Богуцкий В.Б., Дзюбаба Р.Н. Прогнозирование параметров шероховатости поверхности при абразивной обработке // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2017. №8. С. 262–269.
9. Voronov S.A., Veidun M. Mathematical Modeling of the Cylindrical Grinding Process // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2017. Vol. 46(44). Pp. 394–403.
10. SolerYa.I., Nguyen Van Le Modeling and predicting flatness deviations under plane grinding of parts made of 30HGSА hardened steel // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2016. № 4 (111). Pp. 54–65.
11. Колтунов И.И., Лобанов А.С. Зависимость точности шлифования от параметров наладки // *Известия Московского государственного технического университета МАМИ*. 2012. №1(13). С. 223–226.
12. Osipov A.A., Osipov A.P. Theoretical research of work-piece surface forming in grinding // *Materials Today: Proceeding*. 2020. Vol. 38. Pp. 1–3.
13. Акинцева А.В. Основные этапы моделирования послойного съема металла с применением цифрового двойника операции круглого шлифования с ЧПУ // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение*. 2020. №3. С. 48–58.
14. Переверзев П.П. Модель формирования погрешностей внутришлифовальной обработки // *СТИН*. 2016. № 6. С. 25–30.
15. Akintseva A.V., Pereverzev P.P. Complex optimization of parameters for controlling the cycle of internal grinding by the method of dynamic programming // *J. MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 129. No. 01019.

References

1. Gong Y.D., Wang B., Wang W.S. The simulation of grinding wheels and ground surface roughness based on virtual reality technology. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, vol. 129, pp. 123–126.
2. Hecker R., Liang S.Y. Predictive modeling of surface roughness in grinding. *I. J. of Machine Tools and Manufacture*, 2003, vol. 43(8), pp. 755–761.
3. Zhou X., Xi F. Modeling and predicting surface roughness of the grinding process. *International Journal of*

- Machine Tools & Manufacture, 2002, vol. 42, pp. 969–977.
4. Kumar S., Paul S. Numerical modelling of ground surface topography: effect of traverse and helical superabrasive grinding with touch dressing. *Production Engineering*, 2012, vol. 6 (2), pp. 199–204.
5. Shirokov A.V., Osipov A.P. On the issue of predicting and ensuring the roughness parameters of the ground surface. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy, Mashinostroyeniye* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2007, no. 6, pp. 76–88. (In Russ.)
6. Voronov S.A., Weidong Ma, Voronova I.S. A stochastic model of abrasive processing. Kinematics of flat grinding. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy, Mashinostroyeniye* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2017, no. 11, pp. 68–78. (In Russ.)
7. Kozlov A.M., Efremov V.V. Formation of microrelief during processing by an abrasive tool. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy, Mashinostroyeniye* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2004, no. 1, pp. 59–64. (In Russ.)
8. Novoselov Yu.K., Bogutsky V.B., Dzyubaba R.N. Prediction of surface roughness parameters during abrasive processing. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Engineering Sciences], 2017, no. 8, pp. 262–269. (In Russ.)
9. Voronov S.A., Veidun M. Mathematical modeling of the cylindrical grinding process. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2017, vol. 46(44), pp. 394–403.
10. Soler Ya.I., Nguyen Van Le. Modeling and predicting flatness deviations under plane grinding of parts made of 30KhGSA hardened steel. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2016, no. 4 (111), pp. 54–65. (In Russ.)
11. Koltunov I.I., Lobanov A.S. Dependence between grinding accuracy and adjustment parameters. *Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta MAMI* [Proceedings of Moscow State Technical University MAMI], 2012, no. 1(13), pp. 223–226. (In Russ.)
12. Osipov A.A., Osipov A.P. Theoretical research of workpiece surface forming in grinding. *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 38, pp. 1–3.
13. Akintseva A.V. Main stages of modeling a layer-by-layer metal removal, using a digital twin of the circular CNC grinding operation. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroyeniye* [Bulletin of SUSU. Series: Mechanical Engineering Industry], 2020, no. 3, pp. 48–58. (In Russ.)
14. Pereverzev P.P. A model of generating errors of internal grinding processing. *STIN* [Machines and Tools], 2016, no. 6, pp. 25–30. (In Russ.)
15. Akintseva A.V., Pereverzev P.P. Complex optimization of parameters for controlling the cycle of internal grinding by the method of dynamic programming. *J. MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 129, no. 01019.

Поступила 08.02.2022; принята к публикации 22.02.2022; опубликована 25.03.2022
Submitted 08/02/2022; revised 22/02/2022; published 25/03/2022

Акинцева Александра Викторовна – кандидат технических наук, доцент кафедры техники, технологии и строительства, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: akintsevaav@susu.ru. ORCID 0000-0003-0588-1401

Переверзев Павел Петрович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии автоматизированного машиностроения, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: pereverzevpp@susu.ru. ORCID 0000-0002-1416-8918

Aleksandra V. Akintseva – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Engineering, Technology and Construction, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: akintsevaav@susu.ru. ORCID 0000-0003-0588-1401

Pavel P. Pereverzev – DrSc (Eng.), Associate Professor of the Department of Automated Mechanical Engineering Technology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia. Email: pereverzevpp@susu.ru. ORCID 0000-0002-1416-8918

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.7
DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-1-105-111



ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГЕОМЕТРИИ РЫЧАГОВ РАДИАЛЬНО-КОВОЧНОЙ МАШИНЫ

Некрасов И.И., Паршин В.С., Федулов А.А.

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

Аннотация. Постановка задачи. В процессе работы узлы и элементы ковочных машин различного назначения подвергаются воздействию переменных во времени нагрузок, что связано с характером взаимодействия инструмента с обрабатываемым металлом. Динамические расчеты конструкций ковочных машин позволяют оценить характер и величину этих нагрузок, проводить расчет деталей машин на выносливость путем определения коэффициентов запаса по действующим в них напряжениям. В случае получения малых расчетных значений коэффициентов запаса появляется необходимость в корректировке либо технологического режима обработки металла, либо, что производится чаще, в изменении конструкции ковочной машины. Путем изменения геометрии, масс деталей и т.п. в ряде случаев удается снизить нагруженность узлов ковочной машины и тем самым повысить безотказность и долговечность ее работы, снизить металлоемкость оборудования. Поэтому тема данной статьи, заключающаяся в поиске рациональных геометрических параметров рычагов рычажной радиально-ковочной машины, является актуальной. **Используемые методы.** Для нахождения значений моментов от технологической нагрузки, действующей при ковке на рычаги радиально-ковочной машины с закрепленными на них бойками, решалась задача по определению силы ковки прутков с использованием метода совместного решения приближенных уравнений равновесия и пластичности металла в очаге деформации. Затем было произведено построение динамической модели привода, составлена система дифференциальных уравнений, описывающих динамику привода рычажной РКМ по каждой из веток, осуществлено решение. **Результаты.** Результаты решения использованы для нахождения коэффициентов динамичности нагрузок, действующих на рычаги радиально-ковочной машины, и коэффициентов запаса по напряжениям, действующим в теле каждого из рычагов при различных значениях их геометрических параметров. **Практическая значимость.** Проведенные в представленной работе исследования позволили определить рациональные геометрические параметры рычагов радиально-ковочной машины. Использование данных параметров на практике позволит снизить действующие на рычаги динамические нагрузки, увеличить их стойкость и уменьшить металлоемкость конструкции.

Ключевые слова: радиальная ковка, радиально-ковочная машина, динамика привода, коэффициент динамичности, коэффициент запаса прочности.

© Некрасов И.И., Паршин В.С., Федулов А.А., 2022

Для цитирования

Некрасов И.И., Паршин В.С., Федулов А.А. Выбор рациональных параметров геометрии рычагов радиально-ковочной машины // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №1. С. 105–111. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-1-105-111>



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

CHOOSING RATIONAL GEOMETRY PARAMETERS OF LEVERS FOR A RADIAL FORGING MACHINE

Nekrasov I.I., Parshin V.S., Fedulov A.A.

Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

Abstract. Problem Statement. During operation, the components and elements of forging machines for various purposes are exposed to time-varying loads, which is associated with the nature of the interaction of the tool with the processed metal. Dynamic calculations of forging machine designs allow us to assess the nature and magnitude of these loads, to calculate the machine parts for fatigue strength by determining the reserve coefficients for the acting stresses. In case of obtaining low calculated values of the reserve coefficients, there is a need to adjust either the technological mode of metal processing or, which is more often, to change the design of the forging machine. By changing the geometry, weight of parts, etc. in some cases, it is possible to reduce the load of the forging machine components and thereby increase reliability and durability of its operation, reduce the metal consumption of the equipment. Therefore, the topic of this paper, which consists in finding rational geometric parameters of levers of a lever radial forging machine, is relevant. **Methods Applied.** To find the values of the moments from the technological load, acting during forging on the levers of the radial forging machine with strikers fixed on them, the problem of determining the force of forging bars was solved, using a method of joint solution of approximate equations of equilibrium and ductility of metal in the deformation center. Then the authors developed a dynamic model of the drive, compiled a system of differential equations, describing dynamics of the lever radial forging machine drive for each of the branches, and implemented the solution. **Results.** The results of the solution are used to find the dynamic coefficients of the loads, acting on the levers of the radial forging machine, and the reserve coefficients for the stresses, acting in the body of each of the levers at different values of their geometric parameters. **Practical Relevance.** The studies carried out and described in the presented paper made it possible to determine the rational geometric parameters of the levers of the radial forging machine. The use of these parameters in practice will reduce the dynamic loads, acting on the levers, increase their durability and reduce the metal consumption of the structure.

Keywords: radial forging, radial forging machine, drive dynamics, dynamic coefficient, reserve coefficient.

For citation

Nekrasov I.I., Parshin V.S., Fedulov A.A. Choosing Rational Geometry Parameters of Levers for a Radial Forging Machine. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 1, pp. 105–111. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-1-105-111>

Введение

Радиально-ковочные машины (РКМ) рычажного типа применяются для подготовки переднего конца труб к волочению,ковки прутков и труб с целью получения высоких физико-механических свойств металла [1–3]. РКМ рычажного типа относятся к радиально-обжимным машинам и имеют ряд конструктивных преимуществ в сравнении с другими ротационно- и радиально-обжимными машинами, предназначенными для обработки полых и сплошных заготовок в холодном и горячем состоянии [4–6]. Радиально-ковочная машина рычажного типа включает в свой состав: электродвигатель привода 1, ременную передачу 2, шпиндель с экс-

центриковыми участками 3, подшипники 4, рычаги 5 с бойками 6, совершающие качательное движение относительно оси закрепления (рис. 1). В процессе работы узлы машины испытывают динамические нагрузки, учет которых необходим при проведении прочностных расчетов. Наибольшему нагружению при этом подвергаются рычаги РКМ.

Целью данного исследования являлось построение математической модели определения рациональных параметров геометрии рычагов радиально-ковочной машины рычажного типа, обеспечивающих максимальное снижение действующих на них динамических нагрузок и увеличение их стойкости, проведение решения на примере радиально-ковочной машины РКМ-45.

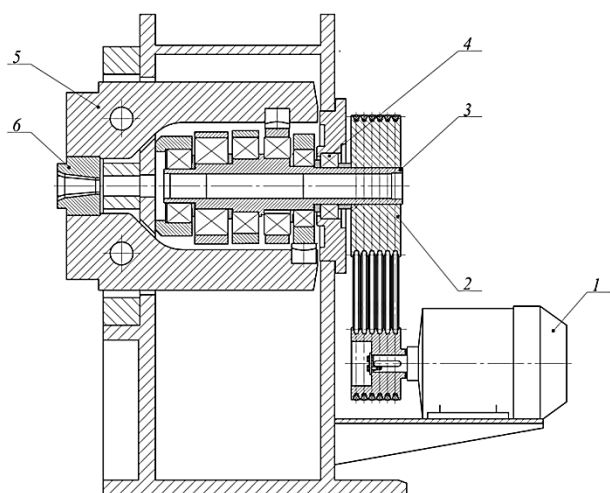


Рис. 1. Четырехбоекная рычажная радиально-ковочная машина
Fig. 1. Four-die lever radial forging machine

Моделирование процесса нагружения элементов привода радиально-ковочной машины

Для нахождения динамических нагрузок в элементах привода радиально-ковочной машины была создана приведенная модель [7–9], представленная в виде многомассовой системы с четырьмя ветками (рис. 2).

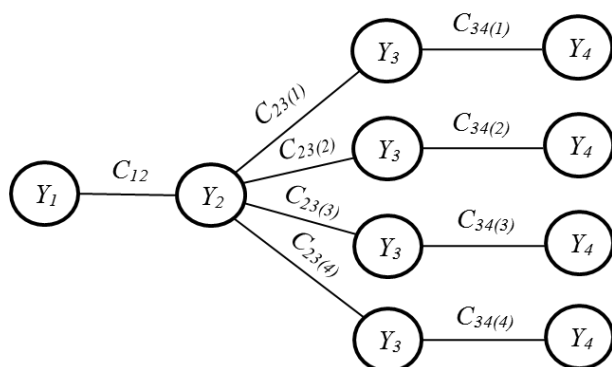


Рис. 2. Динамическая модель привода рычажной радиально-ковочной машины
Fig. 2. Dynamic model of the lever radial forging machine drive

Система дифференциальных уравнений, описывающих динамику привода рычажной РКМ по каждой из веток, выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{d^2}{d\tau^2} M_{12} &= \frac{M_1}{Y_1} C_{12} - C_{12} \frac{Y_1 + Y_2}{Y_1 Y_2} M_{12} + \frac{C_{12}}{Y_2} M_{23}, \\ \frac{d^2}{d\tau^2} M_{23} &= \frac{C_{23}}{Y_2} M_{12} - C_{23} \frac{Y_2 + Y_3}{Y_2 Y_3} M_{23} + \frac{C_{23}}{Y_3} M_{34}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{d^2}{d\tau^2} M_{34} = \frac{M_4(\tau)}{Y_4} C_{34} - C_{34} \frac{Y_3 + Y_4}{Y_3 Y_4} M_{34} + \frac{C_{34}}{Y_3} M_{23},$$

где τ – время, с; M_{12} – момент упругих сил в ременной передаче привода машины, кН·м; M_{23} – момент упругих сил на шпинделе РКМ, кН·м; M_{34} – момент упругих сил на рычаге машины, кН·м; M_1 – момент на валу электродвигателя привода, кН·м; $M_4(\tau)$ – момент от технологической нагрузки, действующей на рычаг машины, кН·м; Y_1 – момент инерции ротора двигателя со шкивом меньшего диаметра ременной передачи, кг·м²; Y_2 – момент инерции шпинделя со шкивом большего диаметра ременной передачи, кг·м²; Y_3 – момент инерции рычага РКМ относительно оси вращения, кг·м²; C_{12} – жесткость ременной передачи привода, кН·м/рад; C_{23} – жесткость вала шпинделя РКМ по рассматриваемой ветке, кН·м/рад; C_{34} – жесткость рычага РКМ по рассматриваемой ветке, кН·м/рад.

Момент от технологической нагрузки задавался функцией вида

$$M_4(\tau) = \tan^{-1}(k_1 \tau)(\sin(k_2 \tau) + 1)k_3,$$

где k_1 , k_2 , k_3 – коэффициенты, определяющие характер кривой нагружения.

Коэффициенты k_1 , k_2 , k_3 находились путем решения задачи по определению сил и моментов, действующих на рычаги радиально-ковочной машины РКМ-45 при ковке прутков, с использованием метода совместного решения приближенных уравнений равновесия и пластичности металла в очаге деформации при ковке.

Жесткости рычагов и их моменты инерции определялись по выражениям

$$C_{34} = \frac{bE}{\frac{2k(1+\mu)}{a_1(h_1+h_2)} + 4 \left[\frac{a_1}{(h_1+h_2)^3} + \frac{l_1}{(h_1+h_3)^3} \right]} \cdot 10^{-6}, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} Y_4 &= \frac{b\rho}{3} \left[a_2^3(h_1+h_2) + l_2^3(h_1+h_3) + \right. \\ &\quad \left. + a_2(h_1^3+h_2^3) + l_2(h_1^3+h_3^3) \right] \cdot 10^{-12}, \end{aligned} \quad (3)$$

где E – модуль упругости материала рычага, Мпа; k – коэффициент формы поперечного сечения; μ – коэффициент Пуассона; ρ – плотность материала рычага, кг/м³; b – ширина сечения рычага, мм; a_1 , a_2 , l_1 , l_2 , h_1 , h_2 , h_3 – геометрические параметры, мм (рис. 3).

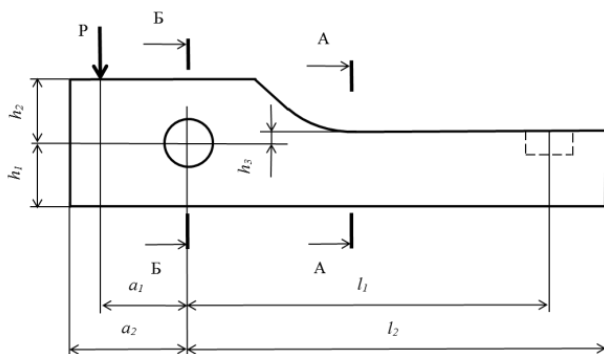


Рис. 3. Рычаг РКМ-45 (расчетная схема)
Fig. 3. The radial forging machine RKM-45 lever (design scheme)

Жесткости рычагов и их моменты инерции определяют частоты собственных колебаний рычагов РКМ. Изменение частот собственных колебаний рычагов в нужном направлении (от резонансной зоны) при неизменной частоте вынуждающей силы позволяет снизить динамические нагрузки, действующие на них. Как видно из выражений (1), (2), наибольшее влияние на жесткости рычагов и их моменты инерции оказывают размеры высоты и длины участков согласно рис. 3.

Поэтому переменными параметрами при исследовании являлись величины: длина рычагов l_1 и l_2 ; высота сечения рычагов h_1+h_2 и h_1+h_3 (существующие параметры: $l_{1(1)}=293$ мм; $l_{1(2)}=404$ мм; $l_{1(3)}=508$ мм; $l_{1(4)}=595$ мм; $l_{2(1)}=l_{2(2)}=l_{2(3)}=l_{2(4)}=640$ мм; $h_1+h_2=250$ мм; $h_1+h_3=132$ мм).

В результате решения составленной системы дифференциальных уравнений, описывающих динамику привода РКМ, были получены значения моментов упругих сил, действующих на каждом из рычагов машины.

В качестве примера на рис. 4 и 5 приведены отдельные результаты расчетов по определению моментов упругих сил для рычага №2 РКМ.

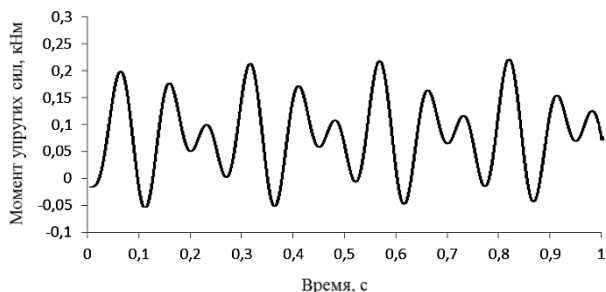


Рис. 4. Зависимость момента упругих сил от времени на рычаге №2 при $l_{1(2)}=404$ мм и $h_1+h_3=132$ мм

Fig. 4. Dependence between moment of elastic forces and time on lever no. 2 at $l_{1(2)}=404$ mm and $h_1+h_3=132$ mm

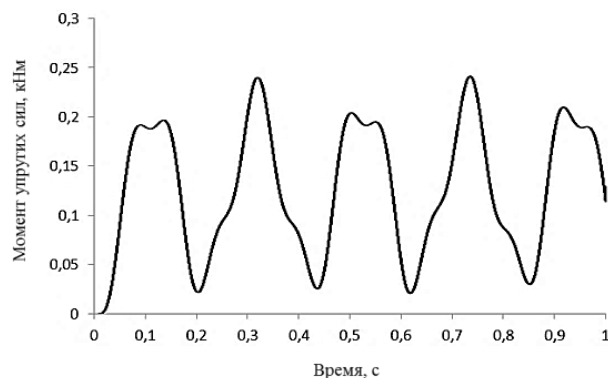


Рис. 5. Зависимость момента упругих сил от времени на рычаге №2 при $l_{1(2)}=504$ мм и $h_1+h_3=112$ мм

Fig. 5. Dependence between moment of elastic forces and time on lever no. 2 at $l_{1(2)}=504$ mm and $h_1+h_3=112$ mm

При известных значениях моментов упругих сил было произведено определение значений коэффициентов динамичности нагрузок, действующих на рычаги РКМ-45, и расчет рычагов РКМ на усталостную прочность путем нахождения коэффициентов запаса прочности в опасных сечениях для случаев изменения высоты сечения рычагов -20, +0, +20 мм от существующего размера и изменения длины рычагов +0, +50, +100 мм от существующего размера, которые сведены в табл. 1, 2.

Таблица 1. Значения коэффициентов динамичности нагрузок, действующих на рычаги РКМ-45
Table 1. Values of dynamic load coefficients, acting on the radial forging machine RKM-45 levers

Номер рычага	Изменение высоты сечения рычага, мм	Изменение длины рычага, мм		
		+0	+50	+100
Рычаг №1	-20	1,18	1,02	0,98
	+0	1,75	1,18	1,02
	+20	3,37	1,55	1,13
Рычаг №2	-20	1,05	0,99	0,97
	+0	1,24	1,05	0,99
	+20	1,67	1,18	1,05
Рычаг №3	-20	1,0	0,96	0,95
	+0	1,14	0,98	0,96
	+20	1,23	1,09	0,99
Рычаг №4	-20	0,98	0,95	0,93
	+0	1,05	0,98	0,96
	+20	1,15	1,01	0,97

Таблица 2. Значения коэффициентов запаса прочности для рычагов РКМ-45 (величина без скобок – сечение А-А; величина в скобках – сечение Б-Б (см. рис. 3))

Table 2. Values of reserve coefficients for the radial forging machine RKM-45 levers (the value without brackets is section A-A; the value in brackets is section B-B (see Fig. 3))

Номер рычага	Изменение высоты сечения рычага, мм	Изменение длины рычага, мм		
		+0	+50	+100
Рычаг №1	-20	3,51 (2,87)	3,53 (3,54)	3,54 (3,97)
	+0	2,70 (1,88)	4,15 (3,47)	4,53 (4,34)
	+20	1,63 (1,01)	4,26 (3,19)	5,05 (4,41)
Рычаг №2	-20	3,16 (3,59)	3,17 (3,92)	3,18 (4,07)
	+0	3,12 (3,08)	3,94 (4,43)	4,12 (4,69)
	+20	2,88 (2,51)	4,32 (4,55)	5,00 (5,14)
Рычаг №3	-20	2,96 (3,92)	2,97 (4,03)	2,98 (4,11)
	+0	3,22 (3,68)	3,75 (4,41)	3,87 (4,82)
	+20	3,61 (3,63)	4,59 (4,76)	4,90 (5,67)
Рычаг №4	-20	2,85 (3,97)	2,86 (4,08)	2,86 (4,14)
	+0	3,44 (4,18)	3,69 (4,61)	3,75 (4,93)
	+20	3,92 (4,25)	4,63 (5,30)	4,82 (6,04)

Значения коэффициентов динамичности нагрузок при этом находились по формуле [10]

$$k_d = \frac{M_y}{M_T},$$

где M_y – максимальное значение момента упругих сил, кН·м; M_T – максимальное значение момента от технологической нагрузки на рычаге, кН·м.

Анализ полученных результатов

Анализ полученных расчетных значений коэффициентов динамичности нагрузок и коэффициентов запаса прочности позволяет сделать следующие выводы.

При изменении высоты сечения рычагов в сторону уменьшения (-20 мм) при существующих значениях длин минимальное значение коэффициента запаса прочности [11, 12] для рычагов увели-

чивается с $n = 1,88$ (рычаг №1, сечение Б-Б) до $n = 2,85$ (рычаг №4, сечение А-А), что связано со снижением частоты собственных колебаний рычагов и динамических нагрузок, действующих на них. При изменении высоты сечения рычагов в сторону увеличения (+20 мм) при существующих значениях длин минимальное значение коэффициента запаса прочности уменьшается с $n = 1,88$ (рычаг №1, сечение Б-Б) до $n = 1,01$ (рычаг №1, сечение Б-Б), что связано с увеличением частоты собственных колебаний рычагов и динамических нагрузок, действующих на них. Изменение длин рычагов на +50 и +100 мм при существующем значении высоты ведет к снижению частоты собственных колебаний и динамических нагрузок. Минимальное значение коэффициента запаса прочности при этом увеличивается с $n = 1,88$ (рычаг №1, сечение Б-Б) до $n = 3,47$ (рычаг №1, сечение Б-Б) при +50 мм изменения длины и $n = 3,75$ (рычаг №4, сечение А-А) при +100 мм изменения длины. При комбинации изменения высоты сечения рычагов и их длины при уменьшении высоты на -20 мм и увеличении длины при +50 и +100 мм получаем увеличение минимального значения коэффициента запаса прочности до величины $n = 2,86$ (рычаг №4, сечение А-А). А при комбинации изменения высоты сечения рычагов и их длины при увеличении высоты на +20 мм получаем: при +50 мм длины – минимальное значение коэффициента запаса прочности $n = 3,19$ (рычаг №1, сечение Б-Б); при +100 мм длины – $n = 4,41$ (рычаг №1, сечение Б-Б). Таким образом, с точки зрения металлоемкости, габаритов рычагов и их стойкости к нагрузкам наиболее рациональным является уменьшение высоты сечения рычагов (-20 мм) с сохранением длины существующих конструкций. При этом на 13,2% уменьшается масса рычагов и в 1,52 раза повышается их стойкость к нагрузкам.

Заключение

Рассмотрение задачи по определению значений коэффициентов динамичности нагрузок, действующих на рычаги радиально-ковочной машины рычажного типа, и их расчет на усталостную прочность с использованием составленной динамической модели привода машины и нахождения решения соответствующей ей системы дифференциальных уравнений позволяет определять рациональные геометрические параметры рычагов РКМ. Применение данных параметров на практике позволяет снизить действующие на рычаги РКМ динамические нагрузки, увеличить их стойкость и уменьшить металлоемкость конструкции.

Список литературы

1. Подготовка концов труб перед волочением на радиально-ковочной машине AVS / А.П. Карамышев, И.И. Некрасов, В.С. Паршин, В.А. Сыстеров // *Металлург*. 2008. №9. С. 40–41.
2. Исследование деформационного упрочнения и поврежденности заготовок из тяжелых сплавов на основе вольфрама / Карамышев А.П., Некрасов И.И., Паршин В.С., Федулов А.А., Нестеренко А.В., Смирнов С.В., Швейкин В.П., Вичужанин Д.И. // *Нанотехнологии функциональных материалов (НФМ-16): тр. междунар. науч.-техн. конф. В 2 т. Т. 1*. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. С.148–153.
3. Некрасов И.И., Федулов А.А., Паршин В.С. Определение неоднородности деформации при ковке прутков на рычажной радиально-ковочной машине // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2020. № 3. С.115–118.
4. Радюченко Ю.С. Ротационное обжатие. М.: Машиностроение, 1972. 176 с.
5. Закарлюкин С.И., Коваль Г.И. Получение труб горячим редуцированием на радиально-ковочной машине SSK-14 // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2019. Т. 75. №2. С. 242–246.
6. Jianglin Huang, Carl D. Slater, Anap Mandral, Paul Blackwell. A Dynamic Model for Simulation of Hot Radial Forging Process. International conference on the Technology of the Plasticity. ICTP 2017. Cambridge. United Kingdom. 2017. С. 479–483.
7. Чалова М.Ю., Мишин А.В., Шепелина П.В. Основы динамики машин: учеб. пособие. Ч. 1. М.: РУТ (МИИТ), 2017. 81 с.
8. Вульфсон И.И. Краткий курс теории механических колебаний. М.: ВНТР, 2017. 241 с.
9. Ванин В.А., Колодин А.Н., Однолько В.Г. Расчет и исследование динамических характеристик приводов металлорежущих станков: учеб. пособие. Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. 120 с.
10. Динамика и прочность прокатного оборудования: учеб. пособие / Ф.К. Иванченко, П.И. Полухин, М.А. Тылкин, В.П. Полухин. М.: Металлургия, 1970. 487 с.
11. Федосьев В.И. Соппротивление материалов: учебник для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. 542 с.
12. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. Киев: Наук. думка, 1988. 736 с.
2. Karamyshev A.P., Nekrasov I.I., Parshin V.S., Fedulov A.A., Nesterenko A.V., Smirnov S.V., Shveykin V.P., Vichuzhanin D.I. Study of strain hardening and damage of workpieces made of heavy alloys based on tungsten. *Nanotekhnologii funktsionalnykh materialov (NFM-16): tr. mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Nanotechnologies of Functional Materials (NFM '16): Proceedings of the International Scientific and Technical Conference]. In 2 volumes. Saint Petersburg: Publishing House of Polytechnic University, 2016, vol. 2, pp. 148–153. (In Russ.)
3. Nekrasov I.I., Fedulov A.A., Parshin V.S. Determining inhomogeneity of deformation, when forging rods on a lever radial forging machine. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii* [Blank production in mechanical engineering], 2020, no. 3, pp. 115–118. (In Russ.)
4. Radyuchenko Yu.S. *Rotatsionnoe obzhatie* [Rotary swaging]. Moscow: Mechanical Engineering, 1972, 176 p. (In Russ.)
5. Zakarlyukin S.I., Koval G.I. Pipe production by hot reducing on SSK-14 radial-forging machine. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii* [Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information], 2019, vol. 75, no. 2, pp. 242–246. (In Russ.)
6. Jianglin Huang, Carl D. Slater, Anap Mandral, Paul Blackwell. A dynamic model for simulation of hot radial forging process. International Conference on the Technology of the Plasticity. ICTP 2017. Cambridge. United Kingdom, 2017, pp. 479–483.
7. Chalova M.Yu., Mishin A.V., Shepelina P.V. *Osnovy dinamiki mashin: ucheb. posobie* [Fundamentals of machine dynamics: study guide]. Part 1. Moscow: RUT (MIIT), 2017, 81 p. (In Russ.)
8. Wulfson I.I. *Kratkiy kurs teorii mekhanicheskikh kolebaniy* [A short course in the theory of mechanical vibrations]. Moscow: VNTR, 2017, 241 p. (In Russ.)
9. Vanin V.A., Kolodin A.N., Odnolko V.G. *Raschet i issledovanie dinamicheskikh kharakteristik privodov metallovezhushchikh stankov: ucheb. posobie* [Calculation and research of dynamic characteristics of drives of metal-cutting machines: study guide]. Tambov: Publishing House of TSTU, 2012, 120 p. (In Russ.)
10. Ivanchenko F.K., Polukhin P.I., Tytkin M.A., Polukhin V.P. *Dinamika i prochnost prokatnogo oborudovaniya: ucheb. posobie* [Dynamics and strength of rolling equipment: study guide]. Moscow: Metallurgy, 1970, 487 p. (In Russ.)
11. Fedosiev V. I. *Soprotivleniye materialov: uchebnik dlya vuzov* [Strength of Materials: textbook for universities]. Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2018, 542 p. (In Russ.)
12. Pisarenko G.S., Yakovlev A.P., Matveev V.V. *Spravochnik po soprotivleniyu materialov* [Handbook on strength of materials]. Kiev: Nauk. dumka, 1988, 736 p. (In Russ.)

References

1. Karamyshev A.P., Nekrasov I.I., Parshin V.S., Systеров V.A. Preparation of pipe ends before drawing on the AVS radial forging machine. *Metallurg* [Metallurgist], 2008, no. 9, pp. 40–41. (In Russ.)

Поступила 18.01.2022; принята к публикации 15.02.2022; опубликована 25.03.2022
Submitted 18/01/2022; revised 15/02/2022; published 25/03/2022

Некрасов Игорь Иванович – кандидат технических наук, доцент, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия.
Email: nekrasovii@yandex.ru

Паршин Владимир Сергеевич – доктор технических наук, профессор, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия.

Федулов Артем Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия.
Email: artem.feduloff@yandex.ru

Igor I. Nekrasov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia.
Email: nekrasovii@yandex.ru

Vladimir S. Parshin – DrSc (Eng.), Professor,
Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia.

Artem A. Fedulov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia.
Email: artem.feduloff@yandex.ru

НАДЕЖНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ RELIABILITY AND DURABILITY OF METALLURGICAL EQUIPMENT

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

УДК 621.3

DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-1-112-120

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РАЗРАБОТКИ РЕГЛАМЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ЦЕЛЬЮ МИНИМИЗАЦИИ ЗАТРАТ И УБЫТКОВ ПРЕДПРИЯТИЯ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Кондрашова Ю.Н., Третьяков А.М., Шалимов А.В.

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

Аннотация. Постановка задачи. Эксплуатация промышленного оборудования требует его постоянного поддержания в надлежащем состоянии для сохранения заданного уровня качества производимых им операций и безопасности его работы. С целью систематизации мер по обслуживанию и рационального расходования средств разрабатываются регламенты технического обслуживания и ремонта оборудования. Актуальность обусловлена необходимостью организации условий правильной эксплуатации, текущего обслуживания, своевременного выполнения необходимого ремонта, а также модернизации оборудования. Целью является изучение методов оценки ущерба от аварий и простоев производственного оборудования, связанных с невыполнением мер по ремонту и техническому обслуживанию и приблизительная экономическая оценка ущерба и затрат. **Используемые методы.** В данной статье рассматриваются экономические факторы, которые необходимо учитывать при разработке регламента и которые оказывают влияние на надёжность при эксплуатации. Приведена структура и алгоритм расчёта убытков, относящихся к затратам производителя в случае возникновения аварии. Также производится приблизительный экономический расчёт затрат, связанных непосредственно с производственным оборудованием, что включает в себя ущерб, обусловленный простоями производства, затраты на эксплуатацию и владение оборудованием. **Результат.** Выполненные расчёты были приведены на примере цеха горячекатаного листового проката в условиях металлургического производства. **Практическая значимость.** Результатом работы является оценка величины убытков от простоев оборудования за указанный период и пример выбора предпочитаемого поставщика оборудования на основе укрупнённой оценки общей стоимости владения оборудованием, которые позволяют оценить финансовую значимость разработки грамотного регламента технического обслуживания и ремонта.

Ключевые слова: техническое обслуживание, ремонт, регламент, простои, убытки, затраты, стоимость владения, надёжность.

© Кондрашова Ю.Н., Третьяков А.М., Шалимов А.В., 2022

Для цитирования

Кондрашова Ю.Н., Третьяков А.М., Шалимов А.В. Оценка влияния разработки регламентов технического обслуживания и ремонта производственного оборудования с целью минимизации затрат и убытков предприятия черной металлургии // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №1. С. 112–120. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-1-112-120>



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

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF DEVELOPING PRODUCTION EQUIPMENT MAINTENANCE AND REPAIR SCHEDULES IN ORDER TO MINIMIZE COSTS AND LOSSES OF THE FERROUS METALLURGY ENTERPRISE

Kondrashova Yu.N., Tretiakov A.M., Shalimov A.V.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement. Operation of industrial equipment requires its constant maintenance in good condition to keep a given level of quality and safety of operations. In order to systematize maintenance measures and reasonable expenditure of funds, equipment maintenance and repair schedules are developed. Relevance is determined by a need to organize conditions of correct operation, current maintenance, timely repair and revamping of equipment. The aim is to study methods of assessment of damages from failures and downtime of process equipment occurred due to failure to take measures on repair and maintenance and to provide an approximate economic assessment of damages and expenditures. **Methods Applied.** This paper considers economic factors, which should be taken into account, when developing schedules, and which have an impact on reliability of operation. The paper contains the structure and an algorithm of the calculation of losses related to the manufacturer's costs in case of an accident. The authors also made an approximate economic calculation of the costs directly related to the production equipment, including the damage caused by production downtime, the cost of operation and ownership of the equipment. **Result.** These calculations were given by the example of the shop for hot rolled sheets at the metallurgical enterprise. **Practical Relevance.** The result of the research is an assessment of losses from equipment downtime for the period and an example of the selection of the preferred equipment supplier based on an aggregate assessment of the total cost of ownership of the equipment, which contribute to evaluating financial importance of the development of competent maintenance and repair schedules.

Keywords: maintenance, repair, schedule, downtime, losses, costs, cost of ownership, reliability.

For citation

Kondrashova Yu.N., Tretiakov A.M., Shalimov A.V. Assessment of the Impact of Developing Production Equipment Maintenance and Repair Schedules in Order to Minimize Costs and Losses of the Ferrous Metallurgy Enterprise. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 1, pp. 112–120. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-1-112-120>

Введение

Современные предприятия оснащаются дорогостоящим и разнообразным оборудованием, автоматизированными системами, роботизированными комплексами. В процессе работы они теряют свои рабочие качества, главным образом из-за износа и разрушения отдельных деталей, поэтому снижаются точность, мощность, производительность и другие параметры. Для обеспечения бесперебойной работы оборудования с заданными точностными характеристиками требуется систематическое техническое обслуживание и выполнение ремонтных работ и мероприятий по технической диагностике [1].

Система ТОиР (техническое обслуживание и ремонт) предусматривает комплекс мер по содержанию оборудования, которые предупреждают возможность его работы в условиях патологического старения. Эта система предусмат-

ривает планирование ремонтных работ, потребность в трудовых и материальных ресурсах, изготовление деталей и узлов для замены, установление нормативов трудовых затрат на плановые ремонты. Актуальность данной темы обусловлена необходимостью организации условий правильной эксплуатации, текущего обслуживания, своевременного выполнения необходимого ремонта, а также модернизации оборудования.

Целью ТОиР являются предупреждение, своевременное выявление и устранение отказов и повреждений [2]. Для её достижения применяются следующие меры:

- контроль технического состояния, инспекция в определенном объеме с определенной периодичностью;
- плановая замена элементов по достижении определенной наработки или календарного срока службы;
- плановая или в зависимости от техническо-

го состояния смазка, зарядка, заправка маслом, топливом, иными специальными жидкостями и газами;

- плановый и неплановый ремонт для устранения отказов, предотказных состояний и повреждений.

Целью работы является изучение методов оценки ущерба от аварий и простоев производственного оборудования, связанных с невыполнением мер по ремонту и техническому обслуживанию и приблизительная экономическая оценка ущерба и затрат, влияющих на разработку регламента ТОиР на примере цеха горячекатаного листового проката в условиях металлургического производства.

Назначение регламентов технического обслуживания, прежде всего, направлено на безопасность и надежность эксплуатации, соответствие техническим требованиям тех или иных объектов. Кроме этого, они призваны обнаруживать их неисправности с целью недопущения аварийных ситуаций, которые в современном мире могут привести к техногенным катастрофам и гибели людей.

Главной причиной значительных затрат на ремонт и техническое обслуживание технологического оборудования является низкое качество

самого технического обслуживания, вследствие чего затраты в сфере эксплуатации оборудования за нормативный срок использования в 5–25 раз больше ее цены.

Структура экономического ущерба от аварий

Экономический ущерб от аварий на промышленных предприятиях в основном включает в свою структуру:

- полные финансовые потери организации;
- расходы на ликвидацию аварии;
- социально-экономические потери, связанные с травмированием и гибелью людей (как персонала организации, так и третьих лиц);
- вред, нанесенный окружающей среде;
- косвенный ущерб и потери государства от выбытия трудовых ресурсов.

При оценке ущерба, причиненного аварией на промышленном предприятии, в ходе расследования аварии (10 дней) составляющие ущерба обычно рассчитываются на основе известных исходных данных [3]. Итоговый ущерб, причиненный аварией, рассчитывается после завершения расследования аварии и получения всех необходимых данных. Отдельные составляющие ущерба, как видно на **рис. 1**, могут быть определены обособленно друг от друга [4].

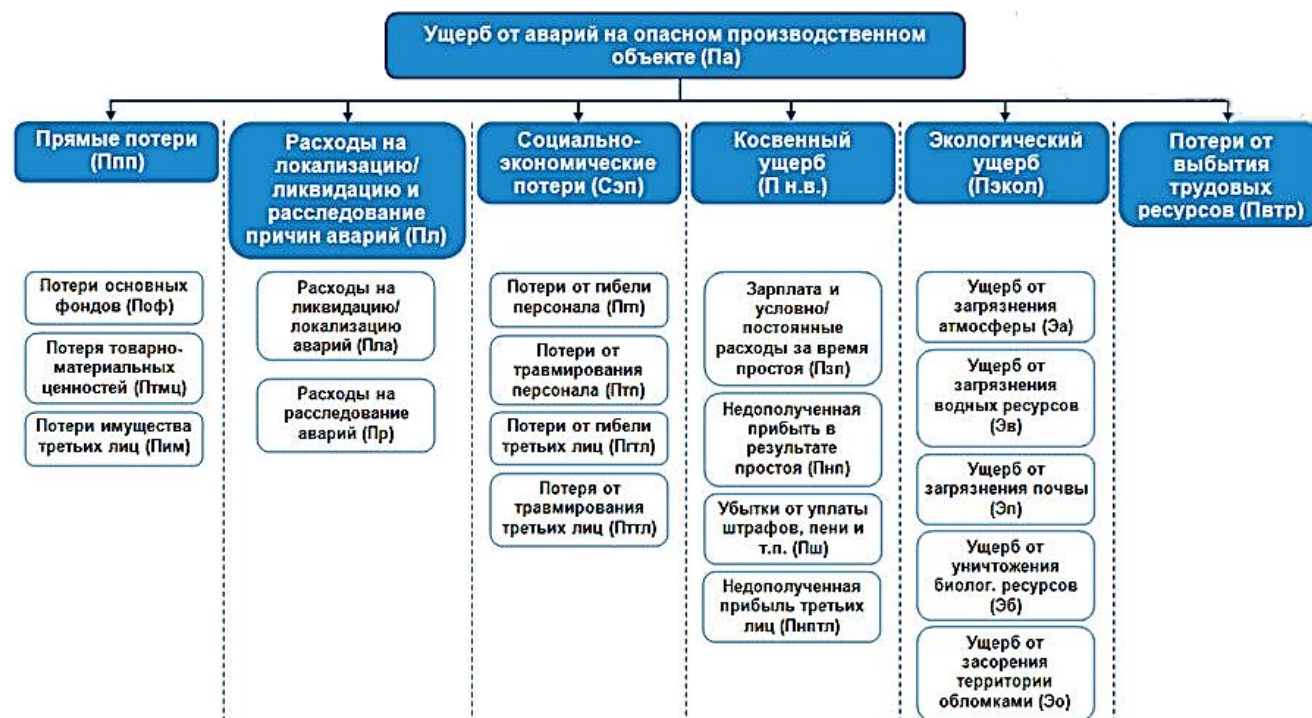


Рис. 1. Структура ущерба от аварии на промышленных предприятиях
Fig. 1. Structure of damage from accidents at industrial enterprises

Ущерб от аварий на промышленном предприятии может быть выражен в общем виде формулой

$$П_a = П_{п.п} + П_{л.а} + П_{с.э} + П_{р.в} + П_{экол} + П_{в.т.р}, \quad (1)$$

где $П_a$ – полный экономический ущерб от аварии, руб.; $П_{п.п}$ – прямые потери организации, эксплуатирующей, руб.; $П_{л.а}$ – затраты на локализацию (ликвидацию) и расследование аварии, руб.; $П_{с.э}$ – социально-экономические потери (затраты, понесенные вследствие гибели и травматизма людей), руб.; $П_{н.в}$ – косвенный ущерб, руб.; $П_{экол}$ – экологический ущерб (урон, нанесенный объектам окружающей среде), руб.; $П_{в.т.р}$ – потери от выбытия трудовых ресурсов в результате гибели людей или потери ими трудоспособности, руб.

Прямые потери от аварий можно определить как

$$П_{п.п} = П_{о.ф} + П_{т.м.ц} + П_{им},$$

где $П_{п.п}$ – прямые потери от аварий, руб.; $П_{о.ф}$ – потери предприятия в результате уничтожения (повреждения) основных фондов (производственных и непроизводственных), руб.; $П_{т.м.ц}$ – потери предприятия в результате уничтожения (повреждения) товарно-материальных ценностей (продукции, сырья и т.п.), руб.; $П_{им}$ – потери в результате уничтожения (повреждения) имущества третьих лиц, руб.

Затраты на локализацию (ликвидацию) и расследование аварии на промышленных предприятиях

$$П_{л.а} = П_{л} + П_{р},$$

где $П_{л.а}$ – затраты на локализацию и расследование аварии; $П_{л}$ – расходы, связанные с локализацией и ликвидацией последствий аварии на промышленных предприятий, руб.; $П_{р}$ – расходы на расследование аварии на промышленных предприятиях, руб.

Социально-экономические потери можно определить как сумму затрат на компенсации и мероприятия вследствие гибели и травмирования персонала и третьих лиц:

$$П_{с.э} = П_{г.п} + П_{г.т.л} + П_{т.п} + П_{т.т.л},$$

где $П_{с.э}$ – социально-экономические потери, руб.; $П_{г.п}$ – компенсации вследствие гибели персонала, руб.; $П_{г.т.л}$ – компенсации вследствие гибели третьих лиц, руб.; $П_{т.п}$ – компенсации вследствие

травмирования персонала, руб.; $П_{т.т.л}$ – компенсации вследствие травмирования третьих лиц, руб.

Косвенный ущерб вследствие аварии на промышленном предприятии рекомендуется определять как часть доходов, недополученных предприятием в результате простоя, зарплату и условно-постоянные расходы предприятия за время простоя, убытки, вызванные уплатой различных неустоек, штрафов, пени, а также убытки третьих лиц из-за недополученной ими прибыли:

$$П_{н.в} = П_{н.п} + П_{з.п} + П_{ш} + П_{т.т.л}, \quad (2)$$

где $П_{н.в}$ – косвенный ущерб, руб.; $П_{н.п}$ – недополученные доходы, руб.; $П_{з.п}$ – затраты на зарплату и условно-постоянные расходы, руб.; $П_{ш}$ – штрафы, неустойки, пени, руб.; $П_{т.т.л}$ – недополученная третьими лицами прибыль, руб.

Экологический ущерб рекомендуется определять как сумму ущербов от различных видов вредного воздействия на объекты окружающей среды:

$$П_{экол} = Э_a + Э_v + Э_п + Э_б + Э_o,$$

где $П_{экол}$ – экологический ущерб, руб.; $Э_a$ – ущерб от загрязнения атмосферы, руб.; $Э_v$ – ущерб от загрязнения водных ресурсов, руб.; $Э_п$ – ущерб от загрязнения почвы, руб.; $Э_б$ – ущерб, связанный с уничтожением биологических (в том числе лесных массивов) ресурсов, руб.; $Э_o$ – ущерб от засорения (повреждения) территории обломками (осколками) зданий, сооружений, оборудования и т.д., руб.

Влияние проведения технического обслуживания на надёжность и безопасность

Существуют два вида технического обслуживания (ТО): предупредительное (профилактическое) и корректирующее (рис. 2) [5].

Предупредительное ТО проводят до наступления отказов [6–8]. Эти работы могут выполняться в зависимости от технического состояния изделия, оцениваемого на основании его мониторинга, до того, как отказ становится неизбежным, или на основе проверок функциональных параметров изделия в целях выявления скрытых функциональных отказов. Предупредительное ТО может также выполняться с установленной заранее периодичностью, исчисляемой в календарном времени или в значениях наработки в часах или циклах, посредством принудительной замены или ремонта изделия в целом или его составных частей.

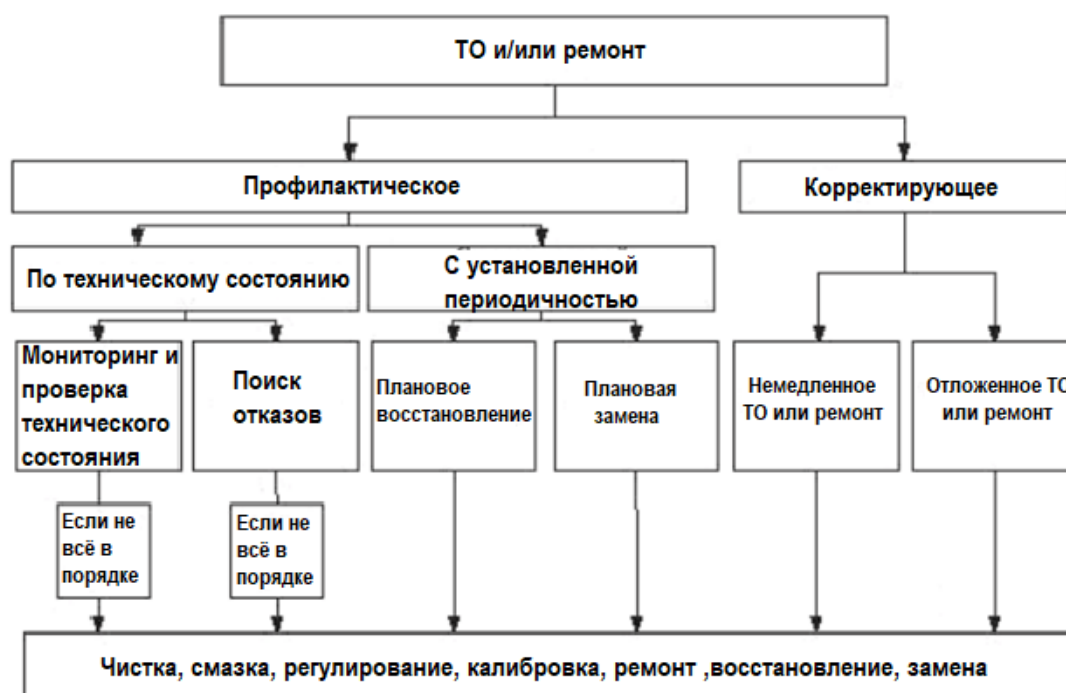


Рис. 2. Последовательность ТО и/или ремонтов
Fig. 2. Sequence of maintenance and/or repairs

Корректирующее ТО выполняют в целях восстановления функционирования изделия после отказа или после снижения его параметров ниже установленных уровней. Некоторые отказы могут считаться допустимыми, если их последствия, такие как снижение производительности, влияние на безопасность, ущерб окружающей среде, экономические последствия, могут считаться приемлемыми в сравнении со стоимостью предупредительного ТО и размерами последующего ущерба от отказов. В этих случаях может применяться планируемый заранее подход, при котором изделие эксплуатируют до отказа, а ТО производят только после его наступления.

Одной из основ надёжно-ориентированного ТО является регламент, в который вносятся также RCA (анализ коренных причин отказов) оборудования, в котором учитываются особенности оборудования, указываются причины выхода его из строя и выносятся рекомендации по его замене, ТО или внесению изменений в его конструктивное устройство.

Анализ видов и последствий отказов (АВПО) – это процедура качественного анализа продукции, технологий производства, правил эксплуатации и хранения, систем технического обслуживания и ремонта. Он включает в себя определение возможных сбоев, отслеживание причинно-следственной связи, приведшей к их возник-

новению, и возможных последствий этих сбоев на заданном и более высоких уровнях, а также качественную оценку и разделение сбоев на основе серьезности их последствий.

Цели проведения АВПО включают в себя обоснование, проверку адекватности, оценку эффективности и мониторинг реализации управленческих решений, направленных на совершенствование конструкции, технологии производства, правил по эксплуатации, систем технического обслуживания и ремонта объектов, предотвращение и снижение тяжести возможных последствий их отказов, а также достижение требуемых характеристик безопасности, экологичности, эффективности и надежности [9–13].

Расчёт ущерба от простоев оборудования

При проведении технико-экономических расчётов по оценке надёжности электроснабжения промышленных предприятий ущерб от простоев, связанных с его перерывами, является одним из важных показателей.

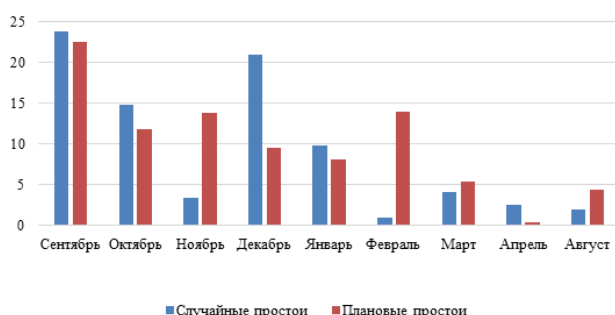
В табл. 1 представлены данные о продолжительности случайных и плановых простоев для рассчитываемого объекта за период с сентября 2020 по август 2021 г. Примем среднюю стоимость 1 часа простоя для этого цеха приблизительно 5 млн руб.

Таблица 1. Продолжительность простоев стана за 2020–2021 гг.

Table 1. Mill downtime for 2020–2021

Месяц	Продолжительность случайных простоев, ч	Продолжительность плановых простоев, ч
Сентябрь	23,8	22,5
Октябрь	14,82	11,72
Ноябрь	3,38	13,83
Декабрь	20,97	9,5
Январь	9,72	8,05
Февраль	0,92	13,92
Март	4,08	5,33
Апрель	2,45	0,42
Август	1,97	4,42
Итого	81,98	90,07

По диаграмме, построенной на основе табличных данных, на **рис. 3** отчетливо видно, что наиболее длительные случайные и плановые простои были зарегистрированы в сентябре и составили 23,8 и 22,5 ч соответственно. Также можно отметить значительные случайные простои в декабре, составившие 20,97 ч.

Рис. 3. Продолжительности простоев оборудования
Fig. 3. Equipment downtime

Произведём расчёт ущерба от простоев за указанный период и за сентябрь, как за самый убыточный месяц.

Расчёт осуществляется по следующей формуле:

$$Y = C_{\text{сп}} \cdot t,$$

где $C_{\text{сп}}$ – средняя стоимость простоя за 1 ч, млн руб./ч; t – продолжительность простоя, ч.

Так, ущерб от случайных простоев за указанный период составит

$$5000000 \cdot 81,98 = 409\,900\,000 \text{ руб.}$$

Аналогичные расчёты сведены в **табл. 2**.

Таблица 2. Расчёт ущерба от простоев

Table 2. Calculation of downtime damage

Период	Простои	Суммарная длительность, ч	Ущерб, млн руб.
Сентябрь 2020 – август 2021 г.	Случайные	81,98	409,9
	Плановые	90,07	450,35
	Суммарные	172,05	860,25
Сентябрь 2020 г.	Случайные	23,8	119
	Плановые	22,5	112,5
	Суммарные	46,3	231,5

Расчёт общей стоимости владения оборудованием

Общая стоимость владения оборудованием (ОСВ) – это суммарные затраты, ложащиеся на владельца оборудования в процессе всего срока владения при условии выполнения всех связанных с владением обязательств.

Так как для разных объектов принципы определения затрат и их структура могут быть различны, универсального подхода к проведению расчётов нет. Но существуют обобщённые подходы к расчёту ОСВ.

Упрощённые методы расчёта позволяют, прежде всего, оценить структуру затрат и вероятные потери, которые могут произойти в процессе владения оборудованием. Однако часть затрат не могут быть спрогнозированы с достаточной точностью, вследствие чего могут иметь место отклонения фактических расходов от теоретических:

$$OCB = \frac{S + C_{\text{рем}} + C_{\text{пр}}}{P}, \quad (3)$$

где ОСВ – общая стоимость владения, руб.; S – цена, руб.; $C_{\text{пр}}$ – стоимость простоя, руб.; P – стойкость, год.

Произведём расчёт ОСВ проходных изоляторов для трёх поставщиков, то есть рассмотрим цикл установки и замены проходных изоляторов для трёх подстанций, для выбора предложения для замены на подстанции:

$$P = \frac{T_{\text{списан}} \cdot N_{\text{уст}}}{N_{\text{списан}}},$$

где $N_{\text{уст}}$ – количество в установке, шт.; $N_{\text{списан}}$ – количество списаний, шт.; $T_{\text{списан}}$ – период списаний, год.

$$P_a = \frac{4 \cdot 80}{120} = 3,2 \text{ года};$$

$$P_6 = \frac{15 \cdot 80}{85} = 14,6 \text{ года};$$

$$P_b = \frac{20 \cdot 80}{100} = 16 \text{ лет.}$$

Для корректности расчёта ОСВ расчёт должен проводиться при выполнении условия

$$N_{\text{списан}} \geq N_{\text{уст}}; \quad (4)$$

$$120 \geq 80 \text{ (поставщик 1);}$$

$$85 \geq 80 \text{ (поставщик 2);}$$

$$100 \geq 80 \text{ (поставщик 3).}$$

Это время, за которое будут заменены все находящиеся в установке позиции, то есть выполняется условие (4).

Для принятия решения необходимо придерживаться следующего алгоритма.

Для проведения расчёта согласно формуле (3) не обязательно применение трёх составляющих числителя:

1. Если позиция отличается от анализируемых минимальной ценой и максимальной стоимостью, то в расчёт включается только её цена:

$$ОСВ_a = \frac{S}{P};$$

$$ОСВ_a = \frac{400000}{3,2} = 125 \text{ тыс. руб.};$$

$$ОСВ_6 = \frac{520000}{14,6} = 35,62 \text{ тыс. руб.};$$

$$ОСВ_b = \frac{610000}{16} = 38,13 \text{ тыс. руб.}$$

2. Если значения цены недостаточно, необходимо в расчёт включить стоимость ремонта (замены) позиции:

$$ОСВ = \frac{S + C_{\text{рем}}}{P};$$

$$C_{\text{рем}} = P_{\text{ед}} \cdot N_{\text{спис}};$$

где $C_{\text{рем}}$ – стоимость ремонта, руб.; $P_{\text{ед}}$ – цена ремонта единицы оборудования, руб.

$$C_{\text{рем.а}} = 120 \cdot 1000 = 120\,000 \text{ руб.};$$

$$C_{\text{рем.б}} = 85 \cdot 1000 = 85\,000 \text{ руб.};$$

$$C_{\text{рем.в}} = 100 \cdot 1000 = 100\,000 \text{ руб.};$$

$$ОСВ_a = \frac{400\,000 + 120\,000}{3,2} = 162 \text{ тыс. руб.};$$

$$ОСВ_6 = \frac{520\,000 + 85\,000}{14,6} = 41,4 \text{ тыс. руб.};$$

$$ОСВ_b = \frac{610\,000 + 100\,000}{16} = 44,375 \text{ тыс. руб.}$$

3. Если недостаточно, необходимо в расчёт включить стоимость простоя агрегата:

$$ОСВ = \frac{S + C_{\text{рем}} + C_{\text{пр}}}{P}.$$

Продолжительность единичного простоя для данного примера примем 4 часа, тогда стоимость простоя составит $5\,000\,000 \cdot 4 = 20\,000\,000$ руб. В таком случае получим:

$$\begin{aligned} ОСВ_a &= \frac{400\,000 + 120\,000 + 20\,000\,000}{3,2} = \\ &= 6\,412\,500 \text{ руб.}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} ОСВ_6 &= \frac{520\,000 + 85\,000 + 20\,000\,000}{14,6} = \\ &= 1\,413\,698,63 \text{ руб.}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} ОСВ_b &= \frac{610\,000 + 100\,000 + 20\,000\,000}{16} = \\ &= 1\,294\,375 \text{ руб.} \end{aligned}$$

Включение стоимости простоев в расчёт ОСВ показывает минимальное значение ОСВ для позиций от поставщика №3, что подтверждается их высокой стойкостью. Соответственно, наиболее предпочтительной является продукция от поставщика №3.

Заключение

По итогам проведённой работы был изучен прямой и косвенный экономический ущерб, вызванный производственными авариями, его составляющие и сопутствующие расходы. Рассмотрены факторы, учитываемые при разработке регламента ТОиР для повышения надёжности и

экономичности эксплуатации производственного оборудования.

На примере цеха горячекатаного листового проката в условиях металлургического производства за период с сентября 2020 по август 2021 г. был произведён приблизительный расчёт ущерба, обусловленного простоями. Суммарные убытки предприятия составили 860,25 млн руб. Наиболее значительный ущерб был нанесён в сентябре, его величина составила 231,5 млн руб.

Также на примере проходных изоляторов на подстанции была определена общая стоимость владения оборудованием по трём методам, применяемых при разных условиях расчёта. По итогам сравнения ОСВ продукции от трёх разных поставщиков был выбран оптимальный вариант.

Таким образом, для повышения эффективности регламентов ТОиР необходимо учитывать не только технические, но и экономические факторы, такие как ущерб от аварий, простой оборудования и эксплуатационные затраты.

Список литературы

1. Борисов Ю.С. Организация ремонта и технического обслуживания оборудования // *Электроэнергия. Передача и распределение*. 2018. №2. С. 38–43.
2. Епифанцев Ю.А. Организация технического обслуживания и ремонтов оборудования металлургических предприятий: учебное пособие. Новокузнецк: СибГИУ, 2008. С. 95–98.
3. Малафеев А.В., Юлдашева А.И. Определение ущерба технологически связанных потребителей в задаче оценки надежности электроснабжения металлургического производства // *Кибернетика энергетических систем*. 2018. С. 92–99.
4. Зайцев Н.Л. Экономика, организация и управление предприятием М.: Инфра-М: Проблемы и перспективы, 2004. С. 12–26.
5. Жуйков В.А., Магон А.И. Эксплуатация и ремонт оборудования: учебное пособие. Киров: ВятГУ, 2008. С. 175–179.
6. Анализ интенсивности отказов частотно-регулируемых электроприводов районных тепловых станций при нарушениях электроснабжения / Храмшин В.Р., Одинцов К.Э., Губайдуллин А.Р., Карандаева О.И., Кондрашова Ю.Н. // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика*. 2014. Т. 14. № 2. С. 68–79.
7. Анализ надежности оборудования тепловой электростанции при внедрении преобразователей частоты / Карандаев А.С., Корнилов Г.П., Карандаева О.И., Ротанова Ю.Н., Ровнейко В.В., Галлямов Р.Р. // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика*. 2009. № 4(167). С. 16–22.
8. Khramshin V.R., Nikolayev A.A., Evdokimov S.A., Kondrashova Y.N., Larina T.P. Validation of diagnostic monitoring technical state of iron and steel works transformers // *Proceedings of the 2016 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, EIConRusNW* 2016. 2016. С. 596–600.
9. Evdokimov S.A., Kondrashova Yu.N., Karandaeva O.I., Gallyamova M.S. Stationary system for monitoring technical state of power transformer // *Procedia Engineering*. 2016. С. 18–25.
10. Kondrashova Y.N., Khramshin R.R., Nikolaev A.A., Shurygina G.V. Analysis of thermal state of power transformer of captive power plant *Procedia Engineering*. 2015. Т. 129. С. 832–838.
11. Методика прогнозирования остаточного ресурса электрооборудования при эксплуатации / К.Э. Одинцов, Ю.Н. Ротанова, О.И. Карандаева [и др.] // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2010. № 3-1. С. 192–198.
12. Исследование сходимости метода расчета установившихся режимов систем электроснабжения при работе раздельно с энергосистемой / В.А. Игumenцев, А.В. Малафеев, О.В. Буланова, Ю.Н. Ротанова // *Электротехнические системы и комплексы*. 2005. № 10. С. 129–134.
13. Влияние высоковольтных двигателей собственных нужд на надежность системы электроснабжения собственных нужд ТЭЦ ОАО «ММК» / А.В. Малафеев, О.И. Карандаева, Ю.Н. Ротанова, О.В. Буланова // *Электротехнические системы и комплексы*. 2009. № 17. С. 96–104.

References

1. Borisov Yu.S. Organizing equipment repair and maintenance. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie* [Electric power. Transfer and distribution], 2018, no. 2, pp. 38–43. (In Russ.)
2. Epifantsev Yu.A. *Organizatsiya tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remontov oborudovaniya metallurgicheskikh predpriyatiy: uchebnoe posobie* [Organizing equipment maintenance and repair at metallurgical enterprises: study guide]. Novokuznetsk: SibSIU, 2008, pp. 95–98. (In Russ.)
3. Malafeev A.V., Yuldasheva A.I. Determining damage of process-related consumers to assess reliability of electric power supply at metallurgical enterprises. *Kibernetika energeticheskikh sistem* [Power system cybernetics], 2018, pp. 92–99. (In Russ.)
4. Zaitsev N.L. *Ekonomika, organizatsiya i upravlenie predpriyatiem* [Economics, organization and corporate management]. Moscow: Infra-M: Problems and prospects, 2004, pp. 12–26. (In Russ.)
5. Zhuikov V.A., Magon A.I. *Ekspluatatsiya i remont oborudovaniya: uchebnoe posobie* [Equipment operation and repair: study guide]. Kirov: VyatSU, 2008, pp. 175–179. (In Russ.)

6. Khramshin V.R., Odintsov K.E., Gubaydullin A.R., Karandaeva O.I., Kondrashova Yu.N. Analyzing the rate of failures of variable-frequency drives at district thermal power plants in case of power supply interruption. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering], 2014, vol. 14, no. 2, pp. 68–79. (In Russ.)
7. Karandaev A.S., Kornilov G.P., Karandaeva O.I., Rotanova Yu.N., Rovneyko V.V., Gallyamov R.R. Analyzing reliability of equipment at the thermal power plant, when introducing frequency converters. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering], 2009, no. 4(167), pp. 16–22. (In Russ.)
8. Khramshin V.R., Nikolayev A.A., Evdokimov S.A., Kondrashova Y.N., Larina T.P. Validation of diagnostic monitoring technical state of iron and steel works transformers. Proceedings of the 2016 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, EIConRusNW 2016. 2016, pp. 596–600.
9. Evdokimov S.A., Kondrashova Yu.N., Karandaeva O.I., Gallyamova M.S. Stationary system for monitoring technical state of power transformer. *Procedia Engineering*, 2016, pp. 18–25.
10. Kondrashova Y.N., Khramshin R.R., Nikolaev A.A., Shurygina G.V. Analysis of thermal state of power transformer of captive power plant. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 129, pp. 832–838.
11. Odintsov K.E., Rotanova Yu.N., Karandeva O. I. et al. A method of predicting the residual life of electrical equipment during operation. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Engineering Sciences], 2010, no. 3-1, pp. 192–198. (In Russ.)
12. Igumenshchev V.A., Malafeev A.V., Bulanov O.V., Rotanova Yu.N. Research on convergence of a calculation method of steady-state modes of the electric power supply systems, when operating separately from the power system. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrical Systems and Complexes], 2005, no. 10, pp. 129–134. (In Russ.)
13. Malafeev A.V., Karandeva O.I., Rotanova Yu.N., Bulanov O.V. Influence of high-voltage auxiliary motors on reliability of the auxiliary power supply system of the thermal power plant at OJSC MMK. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrical Systems and Complexes], 2009, no. 17, pp. 96–104. (In Russ.)

Поступила 14.01.2022; принята к публикации 31.01.2022; опубликована 25.03.2022
Submitted 14/01/2022; revised 31/01/2022; published 25/03/2022

Кондрашова Юлия Николаевна – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: rotjuil720@mail.ru. ORCID 0000-0002-5280-5666

Третьяков Андрей Максимович – студент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: Andreyt2001@yandex.ru

Шалимов Алексей Витальевич – студент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: shalimov-alexey@mail.ru

Yuliya N. Kondrashova – PhD (Eng.), Lead Researcher, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
E-mail: rotjuil720@mail.ru. ORCID 0000-0002-5280-5666

Andrei M. Tretyakov – student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: Andreyt2001@yandex.ru

Alexey V. Shalimov – student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: shalimov-alexey@mail.ru