

ВЕСТНИК

Магнитогорского государственного технического
университета им. Г.И. Носова

2018. Т.16, №4

Журнал включен в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук. Сведения о журналах содержатся в международных базах данных Ulrich's Periodicals Directory, Crossref, а также в ВИНТИ и РИНЦ. Электронные версии журнала размещаются на сетевом ресурсе Научной Электронной Библиотеки в сети Интернет.

Издается с марта 2003 года

Редакционная коллегия:

Председатель редакционной коллегии: В.М. Колокольцев (Россия)

Главный редактор: М.В. Чукин (Россия)

Первый зам. главного редактора: Г.С. Гун (Россия)

Зам. главного редактора:

С.Е. Гавришев (Россия), А.Г. Корчунов (Россия),
О.С. Логунова (Россия), В.Р. Храмшин (Россия)

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

Редакция:

Первый зам. главного редактора: Г.С. Гун
Ответственные секретари: М.А. Полякова, М.В. Шубина
Редактор: Н.В. Кутекина
Технический редактор: И.В. Ключникова
Перевод на английский: В.И. Елесина, О.Е. Сухих

© ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2018

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 связей, 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 29.12.10.

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>
E-mail: 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 25.12.2018. Заказ 441. Тираж 500 экз. Цена свободная.

VESTNIK

of Nosov Magnitogorsk State Technical University

2018. Vol. 16, no. 4

The Journal is included in the List of Russian Peer-Reviewed Scientific Journals which are supposed to publish the major results of doctoral and PhD dissertations. Information about the Journal can be found in such international databases as Ulrich's Periodicals Directory and Crossref, as well as in the Russian VINITI database and the Russian Science Citation Index. The digital version of the Journal is available at eLIBRARY.RU.

PUBLISHED SINCE MARCH, 2003

Editorial Board

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

Editor-in-Chief: M.V. Chukin (Russia)

First Deputy Editor-in-Chief: G.S. Gun (Russia)

Deputy Editor-in-Chief:

S.E. Gavrishev (Russia), V.R. Khrushin (Russia),
A.G. Korchunov (Russia), O.S. Logunova (Russia)

V.E. Gromov (Russia), J. Grum (Slovenia)
M. Dabala (Italy), H. Dyja (Poland),
R.O. Dusane (India), Feng Ye (P.R.China),
V.N. Kalmykov (Russia), D.R. Kaplunov (Russia),
R. Kawalla (Germany), D. Milovanovic (Serbia),
K. Mori (Japan), I.B. Musirin (Malaysia),
A.B. Naizabekov (Republic of Kazakhstan),
M. Pietrzyk (Poland), R. Qin (Great Britain),
V.F. Rashnikov (Russia), G.A. Rogerson (Great Britain),
V.M. Schastlivtsev (Russia), J.-B. Vogt (France)

Editorial Staff:

First Deputy Editor-in-Chief: G.S. Gun

Executive Editors: M.A. Polyakova, M.V. Shubina

Editor: N.V. Kutekina

Technical Editor: I.V. Klyunnikova

Translated into English: V.I. Elesina, O.E. Sukhikh

© Federal State Budgetary Institution of Higher Education
Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2018

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 29.12.10

Editorial office:

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

Editorial office:

45/2 Karla Marksa 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: 25.12.2018. Order 441. Circulation: 500. Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

Разработка полезных ископаемых	4
<i>Хоменко О.Е., Ляшенко В.И.</i>	
Геодинамическая безопасность при увеличении глубины разработки рудных месторождений	4
<i>Великанов В.С., Панфилова О.Р., Усов И.Г.</i>	
Анализ показателей долговечности рукояти карьерного экскаватора	13
Технологии переработки и утилизации техногенных образований и отходов	21
<i>Абдрахманова Р.Н., Орехова Н.Н., Фишер Х.-Б., Абдрахманов Р.Н., Нефедьев А.П., Коссов Д.Ю.</i>	
Обзор методов удаления сульфатов из техногенных вод горных предприятий	21
Металлургия черных, цветных и редких металлов	30
<i>Липатников А.В., Шмельёва А.Е., Степанов Е.Н., Шнайдер Д.А.</i>	
Оптимизация потребления угольного сырья в ПАО «ММК» на основе математического моделирования	30
Обработка металлов давлением	39
<i>Сидельников С.Б., Чибисова Е.С., Лопатина Е.С., Дитковская Ю.Д., Биндарева К.А., Лопатин В.А.</i>	
Исследование технологии получения биметаллических деформированных полуфабрикатов при производстве ювелирных цепей из сплавов красного золота	39
Материаловедение и термическая обработка металлов	45
<i>Мирзаев Д.А., Безик А.С., Созыкин С.А., Маковецкий А.Н.</i>	
Влияние межкритической закалки на механические свойства стали 13X11H2B2MF	45
<i>Атрошенко С.А.</i>	
Влияние аэротермоакустической обработки на характеристики быстрорежущих сталей	50
Энергетика металлургии, энергосбережение и электротехнические комплексы	57
<i>Романов К.В., Моторин А.В., Соломин Е.В., Ковалёв А.А., Дьяченко И.И., Галеев Р.Г.</i>	
Моделирование термоэлектрического модуля Пельтье в режиме генерации электроэнергии в среде ANSYS Workbench	57
Сведения об авторах	65

CONTENTS

Mineral Mining	4
<i>Khomenko O.E., Lyashenko V.I.</i>	
Geodynamic safety when increasing the depth of underground mining of ore deposits	4
<i>Velikanov V.S., Panfilova O.R., Usov I.G.</i>	
Analysis of the dipper handle durability	13
Processing and Recycling Technology of Technogenic Formations and Wastes	21
<i>Abdrakhmanova R.N., Orekhova N.N., Fischer H.-B., Abdrakhmanov R.N., Nefedjev A.P., Kossov D.Y.</i>	
Methods of sulfate removal from mining waste waters: overview	21
Metallurgy of Ferrous, Non-Ferrous and Rare Metals	30
<i>Lipatnikov A.V., Shmelyova A.E., Stepanov E.N., Shnayder D.A.</i>	
Mathematical modeling and optimization of raw coal consumption in PJSC «MMK»	30
Metal Forming	39
<i>Sidelnikov S.B., Chibisova E.S., Lopatina E.S., Ditkovskaya Yu.D., Bindareva K.A., Lopatin V.A.</i>	
Study of the technique to produce bimetallic deformed semi-finished products for jewelry chains made from red gold	39
Materials Science and heat treatment of metals	45
<i>Mirzaev D.A., Bezik A.S., Sozykin S.A., Makovetskii A.N.</i>	
Effect of intercritical quench hardening on mechanical properties of 11% CR steel	45
<i>Atroshenko S.A.</i>	
Changes in the characteristics of tool steel after aerothermoacoustic treatment	50
Power Engineering in Metallurgy, Energy Saving and Electrotechnical Systems	57
<i>Romanov K.V., Motorin A.V., Solomin E.V., Kovalyov A.A., Diachenko I.I., Galeev R.G.</i>	
Simulating the Peltier thermoelectric module in the electricity generation mode in the ANSYS Workbench environment	57
Information about authors	65

РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

UDC 622.831.24.001

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-4-4-12>

GEODYNAMIC SAFETY WHEN INCREASING THE DEPTH OF UNDERGROUND MINING OF ORE DEPOSITS*

O.E. Khomenko¹, V.I. Lyashenko²¹ National Technical University Dniprovsk Polytechnic, Dnipro, Ukraine² Ukrainian Research and Design Institute for Industrial Technology, Zhovti Vody, Ukraine**Abstract**

Statement of the problem (relevance of the paper): the paper describes main scientific and practical results of studies on increasing geodynamic safety, while increasing the depth of underground mining of ore deposits, using operational control data and the forecast for the stressed state of the rock mass with various dynamic signs of rock pressure, and prevention of rock bursts. Using the example of ore deposits in Ukraine, we analyzed physical properties of rocks and new hypothesis of rock pressure, taking into account the relation between the excavation of ore and rocks and time and area, determining parameters of structural elements of development strategies. **Purpose of the paper:** the paper aims at increasing geodynamic safety, when increasing the depth of ore deposit underground mining, by controlling and forecasting the stressed state of the rock mass with various dynamic signs of rock pressure, and by preventing rock bursts. **Methods used:** we applied advanced methods of mine, laboratory and experimental studies, theoretical and physical simulation, and analysis and generalization of the results of studies using standard and recommended techniques. **Novelty:** novel elements include the systematization of technological solutions for managing developed areas of the mine, taking into account the technology-related factors affecting the energy state of the mass, and showing ways to minimize its impact on the technology of ore and nonmetallic mineral resources mining. **The result:** the paper proposes to change the impact rate of the technology-related state of the mass formed by subsequent, contiguous mined-out areas, a method for destroying the rock pillars separating their cavities, which reduces the energy tension of the mass by 6 times and the secondary water cut of the ore deposits in the lying side of the mine field. This makes it possible to carry out preparatory excavations without the use of supports and to increase a stope area by 1.5–2 times. The change in the shape of the mined area of the mine by the formation of unloading cracks makes it possible to reduce the energy parameters of the mass by 0.3 times, when developing the three underlying floors over ore deposits.

Keywords: underground mining, geodynamic safety, competence of the outcrop, energy zone.

Introduction

Scientists from Ukraine, Russia, Germany, Austria, Switzerland, France, England, the USA, Canada, South Africa and other developed mining countries of the world actively engaged in the development of technologies for underground extraction of minerals with increasing depth of development in tense rocks [1–5]. Most researchers took into account changes in the array's tension due to the degree of influence on the parameters of the strength of the workings and development systems. Such an approach made it impossible to reveal the physical nature of the phenomenon of zonal disintegration of rocks, which manifests itself around all without exception, underground

workings. Therefore, the provision of geodynamic safety with increasing depth of underground mining of ore deposits on the basis of operational control data and prediction of a tense state of the rock mass with various forms of dynamic manifestation of rock pressure, prevention and prevention of mountain attacks is an important scientific, practical and social task [6–9]. In order to solve the problems, the authors carried out studies in the field of providing geodynamic safety with increasing depth of underground mining of ore deposits based on the data of operational control and prediction of the tense state of the rock mass with various forms of dynamic manifestation of mountain pressure, prevention and prevention of mountain bumps, with the help of theoretical, laboratory and industrial methods, theoretical analysis and generalization of research results according to standard and new methods [1–9].

* Continuation. The beginning is given in the journal // Vestnik Nosov Magnitogorsk State Technical University. 2018. Vol.16. No. 2. P.14–21.

© Khomenko O.E., Lyashenko V.I., 2018

Theory and methods of research

The authors use the systematic approach, which contains an analysis of the results of research and design work on the development of new technologies and technical means for underground mining of ore deposits to ensure geodynamic safety while increasing the depth of underground mining of ore deposits. The physical properties of rocks and the new hypothesis about mountain pressure are analyzed taking into account the estimation of the stability of the outcrops, revealing the patterns of their deformation and destruction, linking the excavation of ores and rocks in time and space, defining the parameters of the design elements of the development systems, the methods of fastening and the corresponding types of crepe. Theoretical experiments were carried out using thermodynamic, improved and developed energy methods by the authors [4].

Summary of research results

The level of concentration of stresses in the massif at large depths necessitates the transition to a technology with a continuous recess and a straightforward front of purification works. Development systems with chamber recess and laying of the developed space with different compositions and strength in a wide range of mining conditions allow not only to ensure the safety of mining operations, to reduce the probability of rock blows, but also to significantly improve the quality and completeness of extraction of reserves from the interior, which is gaining increasing importance in the competitive struggle for markets of sale [5]. The presence in the mine fields of up to 50% of the developed spaces that have access to the surface of the surface allows us to change their typology and, as a consequence, to change the degree and nature of influence on the host array. For example, it is possible from the developed spaces that have access to the surface of the surface to form the «blind». This makes it possible to change the voltage fields in the massif of the discharge zone of the developed spaces and to create favorable conditions for the pressure factor at the site of mining operations. It is proposed to separate the developed space by means of forming an artificial whole in its cavity. The simulation of possible variants of transformation of the developed spaces showed that the formation of artificial helicopters consisting of the host rocks and the bookmark array is effective. The artificial heaps perceive the pressure of the rocks of the hanging side and reduce the tension in the region of the reference pressure. They also violate the

aerodynamic and hydrodynamic relationship with the surface of the day and reduce air leakage through the excavated space, as well as the penetration of atmospheric precipitation into the mine preparation and cleaning faces of the mine.

1. Classification of methods for studying the state of rocks

The development of deposits in various conditions of occurrence, different properties of ores and rocks is characterized by cracking, stratification, collapse, collapse, shock hazard and other forms of manifestation of energy of mountain pressure. An analysis of mining and geodynamic conditions for the development of ore deposits in Ukraine has shown that dynamic manifestations of rock pressure indicate a high level of elastic potential energy of rocks of domestic ore deposits. The processes of accumulation of stresses in the massif and destruction of rocks, arising in the process of exploration of deposits, are studied by a variety of methods. The basis of most applied research methods is the principle of the dependence of different properties of rocks with their strained-deformed state under the influence of natural and artificial energy fields in the array. In spite of the variety of methods and means of diagnostics used and the control of the strained-deformed state of the array, they can be grouped into functional classes (physical, laboratory, and analytical). In turn, the classes are subdivided into groups (visual, surveying, mechanical, geophysical, etc.) and further on the species. Using the sign «way of representing the array», the existing classification was improved (Table 1).

2. Separation of extended developed spaces

The development of ore deposits of Kryvbass by traditional systems of development to the depths of 1200–1300 m determined the formation of IPs, which represent on the earth's surface the funnel of displacement, and in the interior - void, partly filled with collapsed rocks. These cavities contribute to the redistribution of the initial stresses of the undisturbed massif and to the formation of areas of reference pressure at the mining sites. Through the developed space, an aerodynamic bond with the surface is established, which increases the air leakage into the mine's ventilation network, and the hydrodynamic bond increases the secondary watering of the production units [6]. Effective is the formation of artificial helicopters consisting of the enclosing rocks and the rock massif. Thus, for example, it is possible from the IPs having access to the earth's

surface to form the «blind» VPs. The main element of the proposed technological solution is the formation of artificial helicopters with different ways

of forming shut-off elements for different mining conditions in the northern group of mines of the Kryvyi Rih basin (**Fig. 1**).

Table 1. Classification of the stress-strain state of rocks

Class	Group	View
I. Natural (industrial)	Visual	Observations and Assessments
	Mine Surveying	Mine surveying surveys
	Mechanical	Unloading the array
		Compensation load
		Pressure differences
		Elastic inclusions
		Well deformation
		Depth Ramp
	Geophysical	Acoustic
		Ultrasound
		Radiometric
		Electrometric
		Geomagnetic
II. Physical (laboratory)	Investigation of the properties of rocks	Density
		Mechanical
	Equivalent materials	Modeling on the press
		Centrifugal modeling
	Optical polarization	Modeling on the press
		Centrifugal modeling
		Volume photoelasticity
	Electrodynamic analogies	Electrical grids
		Conductive materials
III. Analytical (theoretical)	Mechanics of rocks	Solid environment
		Elasticity
		Plasticity
		Creep
		Boundary differences
		Boundary elements
		Finishing elements

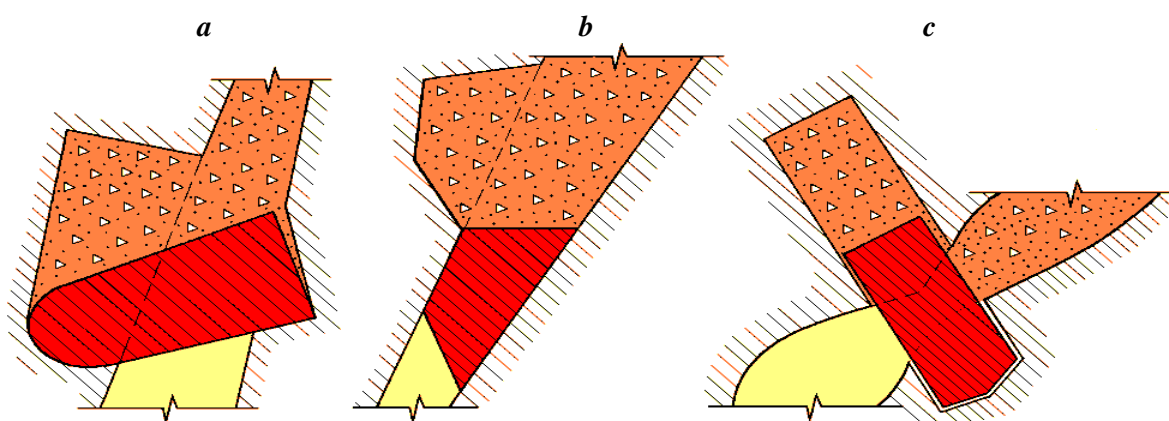


Fig. 1. Principal schemes of the formation of locking elements of the type «shutter» (*a*), «plug» (*b*) and «gate» (*c*) in the formation of artificial helicopters

The space over the artificial whole is filled with a dry or hardening tab. The experience of re-exploration of the deposits of Kryvbas testifies to the fact that the rocks that are destroyed in the developed space, with the condition of absence of movement, are converted into a monolith over time [7]. The experience of the Irtysh mine speaks of the fact that the dry bookmark occupies a significant part of the pressure of the enclosing rocks [8]. When modeling the bookmarking process in laboratory conditions, it was found that with a porosity of 10–12%, the laying material can accept a load of up to 5 MPa with shrinkage not exceeding 13%. Provided that the rock placement is kept in a stationary state and in the presence of a moist medium, its bearing capacity approaches the bearing capacity of the hardening bookmark. Homogenization of the dry rock massif under the influence of static forces of gravity, dynamic forces of explosive waves and the infiltrational influence of atmospheric precipitation helps to create an artificial whole, approaching its properties to the natural.

3. Investigation and substantiation of technological parameters of the developed spaces

The development of ore deposits at Kryvbasa mines is carried out primarily by chamber systems of development (70% of the total volume) and various variants of underground collapse of ores and adjacent rocks (30%) (**Table 2**).

The treatment of ore deposits by systems without the maintenance of adjacent rocks leads to the formation of developed spaces (IPs), in the zones of influence of which stocks of various mineral raw materials fall. These are rich, poor and oxidized ores, related minerals, building materials, stone of precious stones, etc. [9]. The development of the Kryvbass deposits in complex technogenic conditions is deeply studied by B. M. Andreyev, whose

work gives a classification of technogenic factors and methods of their accounting [10]. However, to date, no technical solutions have been proposed for reducing the influence of the main man-made factor in the Kryvbass – VP of mines. To this end, the authors proposed a number of technical solutions for the management of IP at the mines «Kryvbas». The revealed patterns of distribution of voltage fields and the nature of the deformation of the enclosing FP of the array, as well as the presence in the mine fields of a large number of different types of isolated VPs, create favorable conditions for the selection and application of effective methods for controlling the energy status of a rock massif. Reduction of mountain pressure in the areas of conducting preparatory and treatment works is accompanied by resource saving due to the use of less metal-intensive fastening of preparatory workings, increasing the size of the waste chambers, reducing the size of inter-and inter-chamber helicopters. In particular, the VP of «Ternovskaya» mines of PJSC «Kryvorozhsky PJSC» is represented by 1275 m of stale and stratum deposits deposited to the horizon. The collapse of the rocks of the hanging side in the mine field is negligible. Stabilization of the parameters of the displacement zone begins at depths of 500 - 600 m. On the northern flank of the fields of the Ternovskaya mine, there is a canned debris of poor ore «Bulimmerka Magnetite» and a developed deposit of rich ores «8P». The transformation of the VC of the mine to reduce the pressure of the mountain on its lying side is possible due to the destruction of voltage concentrators - natural breeding helicopters separating the separated VPs. This leads to the displacement of the region of energy concentration to the lower end of the newly formed VP, the decrease in the mass of the craters that are destroyed in the IP and the increase of the hydroplastic capacity of the VP (**Fig. 2**) [11–14].

Table 2

Classification of technological solutions for «Kryvbas»

Class deposits	Condition of the next rocks	The essence of the technological solution	Place of Execution mining works
I. Without an exit under sediment («blind»)	Movement rocks is absent	Connection of closeup VPs	Loose gaps between deposits
II .With an exit under sediment		Change forms of PP mine	Lower boundary VP shaft
III. With an exit under sediment	Destruction rocks to the daytime surface	Separation of extended IPs to the detached ones	Middle part VP shaft

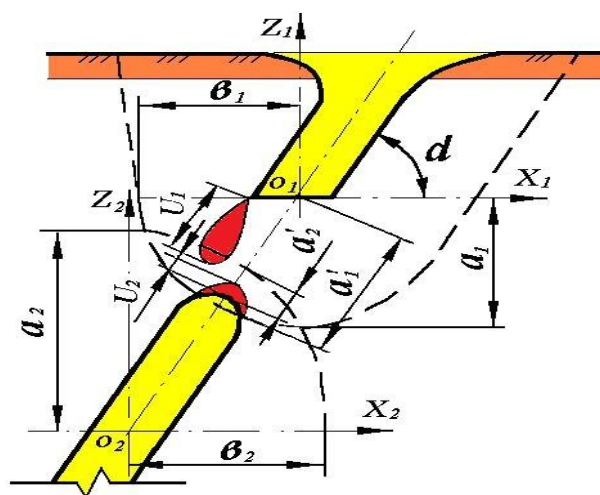


Fig. 2. The calculated scheme of parameters of the destruction of a natural integer

In **fig. 2** the following symbols are given: a_1 and b_1 are the vertical and horizontal semi-axes in the array of the adjacent energy zone of the IP, which extends to the earth's surface, directed along the axes O_1Z_1 and O_1X_1 , m; a_2 and b_2 are the vertical and horizontal half-axes in the array of the contour zone of the VP, which exits to the earth's surface and surrounds the «blind» VP, and directed along the axes O_2Z_2 and O_2X_2 , m; α – angle of propagation VP, hailstones; a_{11} and a_{12} are the depths of the contour energy zones of the «blind» and emerging on the surface of the VP, m; U_1 and U_2 are the depths of possible fracture in the breeding unit, respectively, from the SP that has an exit to the earth's surface and the «blind» VP, m. The main technological parameters for deep mines on the example of Kryvbas, Ukraine are determined in the following sequence. The size of the adjacent energy zone of the PE along the rocks' stretch was determined according to the method [15–17]. The size of the contour energy zone extending to the earth's surface of the VP, located in the breeding heap, m

$$a_1^1 = \sqrt{\frac{(a_1^2 + e_1^2)(a_1 e_1)^2}{(a_1 e_1)^2 + 1}}. \quad (1)$$

Depth of the margin energy zone of the «blind» VP, located in the breeding wholeness, m.

$$a_2^2 = \sqrt{\frac{(a_2^2 + e_2^2)(a_2 e_2)^2}{(a_2 e_2)^2 + 1}} - 0,5h_{BII} \sin \alpha, \quad (2)$$

where h_{BII} – vertical span of the «blind» VP, m.

Depth of propagation of the area of possible de-

struction in the massif of the generic integral for the VP, going out on the earth's surface, m

$$U_1 = H(-0,0047\sigma_{сж} + 0,9), \quad (3)$$

where H – Depth of propagation VP, m; $\sigma_{сж}$ – The strength of the rocks for compression, MPa.

The parameters of drilling and blasting works for deep wells in the field of transient stresses can be efficiently performed by cutting off contouring wells with bursts of column charges according to the method [18]. This reduces the energy costs of blasting and drilling up to 25%. The method of drilling a rock integral is determined based on the location of preparatory and trench excavations on the corresponding horizon. As the results of the calculations for the conditions of the Ternovskaya mine show, the destruction of natural helicopters separating the separated VPs allows to reduce the tension of the massif by 6 times and eliminate the secondary watering of the deposits located in the lying part of the pipeline. This makes it possible to carry out preparatory work without applying the crepe and increasing the height of the waste chambers to 120–150 m [19]. The reserves of rich ore «Kryvbas» at the depth of 1100–1260 m to the north of 227 MO were originally intended to be worked out after the complete working out of magnetite quartzites with the use of traditional technologies for working out of mine fields existing in the Krivoy Rog Basin. In 1996, the relevant recommendations were developed in order to develop technological solutions to reduce the reserves of canned rich ores while maintaining the possibility of further processing of the balance reserves of magnetite quartzites of the GNIGRI GVUZ «KNU» (Kryvyi Rih) in 1996. They reveal the possibility of partial extraction of up to 2.7 million tons of rich ore reserves from the guarded whole, while maintaining the possibility of further processing of magnetite quartzites from the deposit «Northern» due to the abandonment of barrier helicopters in the interior [20].

The collapse of the rocks of the hanging side occurs with the lagging behind the front of the clearing works on 1–2 working floors. The displacement of the rocks of the hanging side stops from a depth of 450–550 m. From these depths, the surface displacement process stabilizes and passes into a partial dome-shaped destruction of the enclosing rocks around the developed space. The angles of displacement and breaking of the rocks by the stretch correspond to 80°, in the hanging and lying sides – 55°. The «Yubileinaya» mines are represented by the «Nest 1–2» and «Home» depleted to a depth of 1100 m (**Fig. 3**).

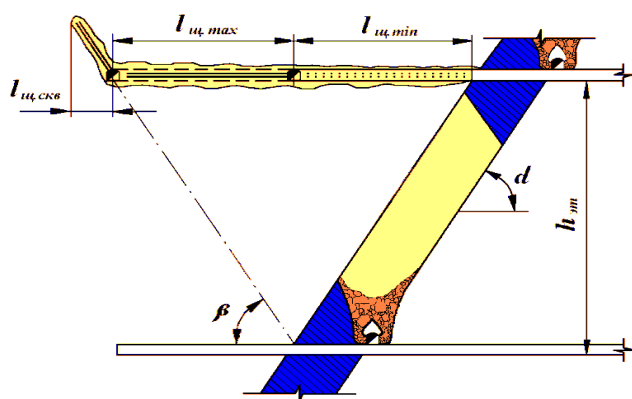


Fig. 3. Schematic diagram of the parameters of the discharge fracture

In **fig. 3** the following conditional symbols are given: $l_{u, \min}$ and $l_{u, \max}$ – the lengths of fractures where changes in the array intensity occur within the first lower floor and, accordingly, the unloading of the second underlying floor, m; $l_{u, ckb}$ is the length of the section of the crack formed by the exploding of the wells at which the unloading of three or more lower floors occurs, m; h_m is the height of the floor under construction, m; α and β – respectively, the angles of incidence and displacement of the rocks of the hanging side of the reservoir, deg.

Investigations have made it possible to establish that the power of the IP, varying from 5 to 90 m, has a small effect (up to 6%) on the overall level of the intensity of the host massif, and the increase of the contour energy zones occurs on the magnitude of the change in the power of the cultivated deposit, leaving the depth of influence unchanged and, accordingly, Voltage values [21, 22]. This fact made it possible to conclude that in the massif around the cracks formed similar energy zones with parameters similar to the developed space. The results of the research allowed to develop a method for reducing the pressure of the mountain for the conditions of working out of preserved reserves at the mine «Yu-bileinaya» due to the formation of unloading cracks. The essence of the process of unloading the underlying massif lies in the development of the crack of the underlying portion of the deposit. For IPs having an exit to the earth's surface, a crack is formed in the hanging side, above its level. The formation of the fracture contributes to an increase in the horizontal span of the VP and, as a consequence, an increase in the contour energy zone and the redistribution of the initial voltage fields. At the same time, the displacement of the reference pressure region, which envelops the treated chambers, takes place in the direction of the formation of the crack and discharg-

es the shaft cleaning units from the pressure of the rock [23]. The presence of tapping workings in the hanging side of the VP reduces the cost of forming the crack and increases its length. On the basis of the research carried out and the results obtained, the authors determined the following parameters and sizes below the established expressions and dependencies.

Total length of unloading crack, m

$$l_m = l_{m, \min} + l_{m, \max} + l_{m, ckb} \quad (4)$$

The length of the fracture site at which the mass of the intensity changes within the first underlying floor, m

$$l_{m, \min} = h_m \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right), \quad (5)$$

where h_m – floor, height of workable m; α – angle of fall of the deposit, deg.

The length of the fracture site at which the second lower floor is unloaded, m

$$l_{m, \max} = h_m \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{2} - \beta \right), \quad (6)$$

where β – angle of rotation of the hanging side, degrees.

The length of the fracture site formed by the exploding of provocative wells, in which the unloading of three or more underlying floors occurs, m

$$l_{m, ckb} = l_{ckb} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{2} - \beta \right) + 0,5W \quad (7)$$

where l_{ckb} – length of discharge wells, m; W – line of the least resistance of the explosive, m.

The regularity of the number of unloaded floors from the length of the crack

$$l_{m, ckb} = l_{ckb} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{2} - \beta \right) + 0,5W_{\text{, sht.}} \quad (8)$$

The maximum lengths of each fracture site are taken from the technical capabilities of deep drilling machines [24]. Thus, the measures taken to reduce the negative influence of the developed space allow us to justify the technological parameters of the mining preparatory and treatment underground work of the Krivoy Rog iron ore basin. Expected economic effect only from the reduction of the pressure on the prepared and ready for production reserves is more than 600 thousand. UAH / year, taking into

account the management of the state of the massif, reducing to 15–30% of total costs of sewage, transport, ventilation, etc.

Direction of further research

The development of technologies for the extraction of ore raw materials in the conditions of technogenesis should be based on the classification of deposits and development systems on the basis of the «energy state of the array at the time of development», which determines the methods for separating material from the array. It is also necessary to consider the constant change in mining and geological and man-made factors [25–27]. The systematization of technological solutions for the management of the developed space of mines while working out, in particular, Krivbass deposits, takes into account the man-made factors affecting the energy status of the massif and shows ways to minimize its influence on the extraction technology of ore and non-metallic minerals, taking into account the developed mining countries of the world [28].

Conclusions

1. It is established that minimization of the influence of extended developed spaces on the energy status of mineral deposits is realized by separating extended developed spaces and forming artificial cavities in their cavity, which allows to reduce the energy saturation of the massif in the field of mining operations up to 6 times and reduce costs by 15% on drainage, transport and ventilation of the mine.

2. It was shown that for the change in the intensity of the influence of the technogenic state of the massif formed by the successively-developed spaces, a method is proposed for the destruction of the generic helicopters separating their cavities, which allows reducing the energy intensity of the massif to 6 times and secondary watering of ore deposits in the lying side of the mine field. This makes it possible to carry out preparatory work without the use of fasteners and increase the size of cleaning chambers in 1.5–2 times.

3. It is recommended that the change in the shape of the developed space of the mine by creating unloading cracks allows us to reduce the energy saturation of the massif by 0.3 times when working out three underlying floors on ore deposits.

References

1. Lavrinenko V.F. Conditions for the equilibrium of stresses in tight rock. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal* [News of the Higher Educational Institutions. Mining Journal], 1982, no. 6, pp. 17–22. (In Russ.)

2. Aleksandrova N.I., Chernikov A.G., Sher E.N. On the damping of pendulum waves in the block rock mass. *Fiziko-tekhicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh* [Physical and Technical Problems of Mining], 2006, no. 5, pp. 67–74. (In Russ.)
3. Tsarikovsky V.V., Tsarikovsky Val.V., Lyashenko V.I. Increase in efficiency of chamber mining of ore deposits. *Gornyy zhurnal* [Mining Journal], 2011, no. 11, pp. 49–52. (In Russ.)
4. Shkuratnik V.L., Nikolenko P.V. *Metody opredeleniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya massiva gornykh porod* [Methods for determining the stress-strain state of the rock mass]. Moscow: MSMU, 2012, 111 p. (In Russ.)
5. Yakovlev D.V., Lazarevich T.I., Tsirel S.V. Natural and man-made seismicity of the Kuznetsk Basin. *Fiziko-tekhicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh* [Physical and Technical Problems of Mining], 2013, no. 3, pp. 20–34. (In Russ.)
6. Eremenko V.A., Rylnikova M.V., Esina E.N., Lushnikov V.N. Substantiation of the method for estimating the propagation zones and the magnitude of the stress concentration in underground mining of ore deposits. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2014, no. 11, pp. 5–12. (In Russ.)
7. Oparin V.N., Timonin V.V., Karpov V.N. A quantitative evaluation of the efficiency of the rock destruction process in case of rotary percussion drilling of wells. *Fiziko-tekhicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh* [Physical and Technical Problems of Mining], 2016, no. 6, pp. 60–74. (In Russ.)
8. Sdvyzhkova O.O., Babets D.V., Kravchenko K.V., Smirnov A.V. Determination of the displacements of rock mass nearby the dismantling chamber under effect of plow longwall. *Naukovyi visnik natsionalnogo gornichogo universitetu* [Scientific Bulletin of National Mining University], 2016, no. 2, pp. 34–42.
9. Eremenko V.A., Aibinder I.I., Patskevich P.G., Babkin E.A. Evaluation of the state of the rock mass at the mines of the Polar Division of OJSC MMC Norilsk Nickel. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2017, no. 1, pp. 5–17. (In Russ.)
10. Khomenko O.E., Lyashenko V.I. Improving safety of ore mining based on the use of geoenery. *Bezopasnost truda v promyshlennosti* [Occupational Safety in Industry], 2017, no. 7, pp. 18–24. (In Russ.)
11. Khomenko O.E., Lyashenko V.I. Geoenerygetic fundamentals of ore deposits underground mining. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal* [News of the Higher Educational Institutions. Mining Journal], 2017, no. 8, pp. 10–18. (In Russ.)
12. Khomenko O.E., Kononenko M., Astafiev D. Effectiveness of geoenery usage during underground mining of deposits. *Advanced Engineering Forum*, 2017, vol. 22, pp. 100–106.
13. Oparin V.N. To theoretical bases of the description of the interaction between geomechanical and physicochemical processes in coal seams. *Fiziko-tekhicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh* [Physical and Technical Problems of Mining], 2017, no. 2, pp. 3–19. (In Russ.)
14. Khomenko O.E., Sudakov A.K., Malanchuk Z.R., Malanchuk E.Z. Principles of rock pressure energy usage during underground mining of deposits. *Naukovyi visnik natsion-*

- al'nogo gornichogo universitetu* [Scientific Bulletin of National Mining University], 2017, no. 2, pp. 35–43.
15. Khomenko O.E., Lyashenko V.I. Development of the principles of stability of excavations in the underground mining of deposits. *Marksheyderiya i nedropolzovanie* [Mine Survey and Subsoil Use], 2018, no. 2(94), pp. 13–20. (In Russ.)
 16. Bulat A.F., Mineev S.P., Bryukhanov A.M., Nikiforov A.V. Development of a classification procedure for gas-dynamic events in coal mines. *Journal of Mining Science*, 49, 894–901 (2013).
 17. Khalymendyk Yu., Baryshnikov A. Substantiation of cable bolts parameters for supporting mine workings in conditions of laminated rocks. *Mining of Mineral Deposits*, 10 (1), 9–15 (2016).
 18. Bondarenko V., Symanovych G., Koval O. The mechanism of over-coal thin-layered massif deformation of weak rocks in a longwall. *Geomechanical Processes during Underground Mining*, 6, 41–44 (2012).
 19. Adushkin V.V., Oparin V.N. Physics and geomechanics of formation and development of local zones of rock destruction in natural and mining systems: the current state, promising directions of fundamental research and applied developments. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2015, no. 56, pp. 24–44. (In Russ.)
 20. Busylo V., Savelieva T., Serdyuk V. Applying noncantilevered support of mechanized complexes for developing flat seams. *Mining of Mineral Deposits*, 10 (2), 9–17 (2016).
 21. Kovalevska I., Barabash M., Gusiev O. Research into the stress-strain state of reinforced marginal massif of extraction mine working by a combined anchoring system. *Mining of Mineral Deposits*, 10 (1), 31–36 (2016).
 22. Stupnik M., Kalinichenko V., Pysmennyi S., Fedko M., Kalinichenko O. Method of simulation of rock mass stability in laboratory conditions on equivalent materials. *Mining of Mineral Deposits*, 10(3), 46–51 (2016).
 23. Nazarova L.A., Nazarov L.A. Evolution of stresses and permeability of the fractured and porous rock mass around a production well. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh* [Physical and Technical Problems of Mining], 2016, no. 3, pp. 11–19. (In Russ.)
 24. Kurlenya M.V., Mirenkov V.E., Savchenko A.V. Calculating the deformation of the mass around buried excavations taking into account the weight of rocks. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh* [Physical and Technical Problems of Mining], 2017, no. 3, pp. 3–11. (In Russ.)
 25. Kurlenya M.V., Mirenkov V.E., Shutov V.A. Features of the deformation of rocks around deep mining. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh* [Physical and Technical Problems of Mining], 2014, no. 6, pp. 4–10. (In Russ.)
 26. Lavrikov S.V., Revuzhenko A.F. A numerical simulation of the process of accumulation and release of elastic energy in structurally heterogeneous geomaterials. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh* [Physical and Technical Problems of Mining], 2016, no. 4, pp. 22–28. (In Russ.)
 27. Adushkin V.V., Kishkina S.B., Kulikov V.I., Pavlov D.V., Anisimov V.N., Saltykov N.V., Sergeev S.V., Spungin V.G. Constructing the monitoring system for potentially dangerous sections of the Korobkovskoye deposit of the Kursk Magnetic Anomaly. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh* [Physical and Technical Problems of Mining], 2017, no. 4, pp. 3–13. (In Russ.)
 28. Khomenko O.E., Lyashenko V.I. Improved geomechanical safety in the underground mining of complex structure deposits. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni G. I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2018, vol.16, no. 2, pp. 14–21. (In Russ.)

Received 11/07/18

Accepted 03/09/18

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

УДК 622.831.24.001

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-4-4-12>

ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ПРИ УВЕЛИЧЕНИИ ГЛУБИНЫ РАЗРАБОТКИ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Хоменко О.Е.

Национальный технический университет «Днепропетровская политехника», г. Днепр, Украина

Ляшенко В.И.

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

Аннотация

Постановка задачи (актуальность работы): описаны основные научные и практические результаты исследований повышения геодинамической безопасности при увеличении глубины подземной разработки рудных месторождений на основе данных оперативного контроля и про-

гноза напряженного состояния горного массива с различными формами динамического проявления горного давления, профилактики и предотвращения горных ударов. На примере рудных месторождений Украины проанализированы физические свойства горных пород и новые гипотезы о горном давлении с учетом увязки выемки

руды и пород во времени и пространстве, определения параметров конструктивных элементов систем разработки. **Цель работы:** повысить геодинамическую безопасность при увеличении глубины разработки рудных месторождений путем контроля и прогноза напряженного состояния горного массива с различными формами динамического проявления горного давления, профилактики и предотвращения горных ударов. **Используемые методы:** применялись усовершенствованные методы шахтных, лабораторных и математических исследований, теоретического и физического моделирования, а также анализ и обобщение результатов исследований по известным и разработанным методикам. **Новизна:** к ее элементам относится систематизация технологических решений по управлению выработанным пространством шахт, которая учитывает техногенные факторы, влияющие на энергетическое состояние массива, и предопределяет пути минимизации его влияния на технологии добычи

рудных и нерудных полезных ископаемых. **Результат:** для изменения интенсивности влияния техногенного состояния массива, сформированного последовательно-сближенными выработанными пространствами, предложен способ разрушения породных целиков, разделяющих их полости, что позволяет снизить энергетическую напряженность массива до 6 раз и вторичную обводненность рудных залежей в лежащем боку шахтного поля. Это дает возможность проведения подготовительных выработок без применения крепей и увеличения размеров очистных камер в 1,5–2 раза. Изменение формы выработанного пространства шахты путем образования разгрузочных трещин позволяет снизить энергетическую насыщенность массива в 0,3 раза при отработке трех нижележащих этажей по рудным залежам.

Ключевые слова: подземная разработка, геодинамическая безопасность, устойчивость обнажений, энергетическая зона.

Поступила 11.07.18

Принята в печать 03.09.18

Образец для цитирования

Хоменко О.Е., Ляшенко В.И. Геодинамическая безопасность при увеличении глубины разработки рудных месторождений // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №4. С. 4–12. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-4-12>

For citation

Khomenko O.E., Lyashenko V.I. Geodynamic safety when increasing the depth of underground mining of ore deposits. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 4, pp. 4–12. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-4-12>

АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ РУКОЯТИ КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА

Великанов В.С., Панфилова О.Р., Усов И.Г.

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

Аннотация. Рассмотрены вопросы прогнозирования показателей надежности рукояти карьерного экскаватора. В качестве основного показателя надежности принят показатель долговечности – средний ресурс. Целью исследования явилось обоснование расчетных зависимостей, позволяющих определить числовые характеристики ресурса рукояти экскаватора методами физической теории надежности. Разработаны расчетные формулы для определения среднего ресурса рукояти на основании измерений или расчетов действующих на нее нагрузок и, следовательно, возникающих в рукояти напряжений. Величина последних, отражая условия эксплуатации карьерных экскаваторов, является случайной величиной, что обусловило случайный характер и ресурса рукояти. В связи с этим возникла необходимость оценки возможного отклонения значения ресурса от среднего значения. Для оценки рассеяния ресурса рукояти карьерного экскаватора предложена методика расчета его дисперсии и среднего квадратического отклонения методом линеаризации функции случайных аргументов. В результате получена методика для расчета численных значений ресурса рукояти карьерного экскаватора с учетом случайной природы этого параметра и изменяющихся эксплуатационных условий. В качестве примера определен ресурс рукояти карьерного экскаватора ЭКГ-5А. Исходными данными для расчета послужили результаты тензометрических измерений напряжений в рукоятях карьерных экскаваторов в условиях горно-обогатительного производства Магнитогорского металлургического комбината. На основании аналогичных исходных данных организован и проведен численный машинный эксперимент по методу Монте-Карло. Числовые характеристики ресурса рукояти карьерного экскаватора, определенные методом линеаризации функции случайных аргументов и методом Монте-Карло, соответствуют статистическим данным о наработках рукоятей в условиях горно-обогатительного производства Магнитогорского металлургического комбината.

Ключевые слова: надежность, долговечность, ресурс, экскаватор, рукоять, отказ, напряжения.

Введение

Условия горного производства требуют своевременного проведения обслуживания и плановых ремонтов машин и оборудования в связи с тем, что любая внеплановая остановка в результате аварийной ситуации крайне негативно сказывается на ритмичности работы предприятия [1, 2]. С другой стороны, под рациональной эксплуатацией горных машин и оборудования подразумевается, в том числе, полное использование их ресурса. Это накладывает ограничение на сокращение межремонтных периодов [3, 4]. Карьерные экскаваторы являются важнейшей составляющей транспортно-технологических комплексов горнодобывающих предприятий. В качестве примера на **рис. 1** и **2** представлены диаграммы, иллюстрирующие отказы экскаваторов в условиях разных горных предприятий. Отказы систематизированы по признаку принадлежности отказавшего элемента к тому или иному узлу [5]. Различия в диаграммах свидетель-

ствуют о заметном влиянии на показатели надежности условий эксплуатации машин.

При планировании срока выполнения ремонтов и технического обслуживания машин и оборудования, как правило, используют рекомендации завода-изготовителя [6]. Из диаграмм на **рис. 1** и **2** следует, что в зависимости от условий эксплуатации оборудования рекомендованные предприятием-изготовителем сроки могут быть скорректированы. Организация постоянного контроля над техническим состоянием деталей и узлов может быть весьма затруднительна, т.к. зачастую для этого требуется остановка машины. Аналитический прогноз ресурса узлов и деталей, составляющих различные структурные единицы оборудования, позволяет решить обозначенную проблему [7–23].

Из диаграмм на **рис. 1** и **2** очевидно, что значительная доля отказов связана с нарушением работоспособного состояния рабочего оборудования. Одним из распространенных видов отказов является усталостное разрушение рукояти карьерного экскаватора.

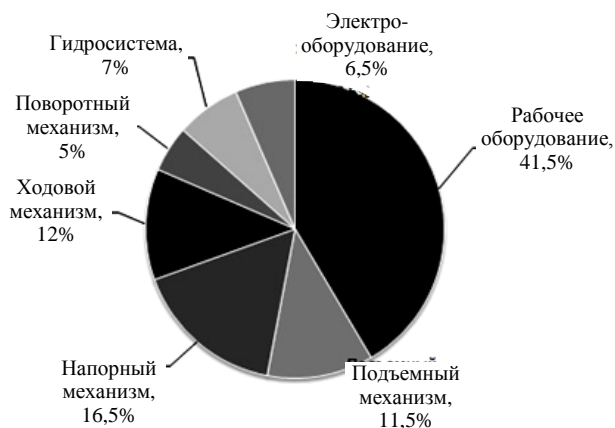


Рис. 1. Распределение отказов экскаваторов по узлам за 2010–2015 гг. на Магнитогорском металлургическом комбинате (Челябинская область)

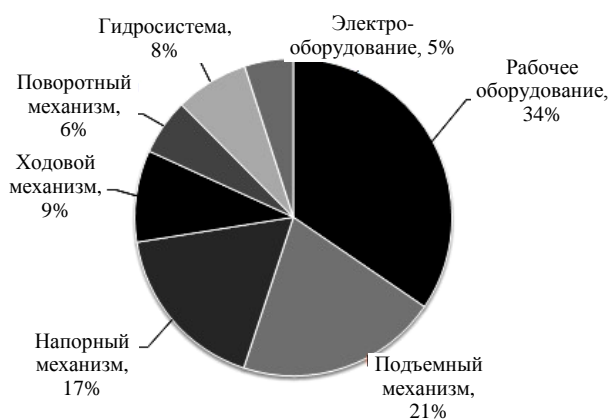


Рис. 2. Распределение отказов экскаваторов по узлам за 2010–2015 гг. на Учалинском горно-обогатительном комбинате (Республика Башкортостан)

Структурно-функциональный метод декомпозиции машин на группы элементов со схожими причинами отказов

Любая машина содержит структурные элементы, каждый из которых выполняет собственную функцию. Любой из элементов можно отнести к одной из трех групп: основные звенья, связи строения или связи функционирования (приводы) [24]. К основным звеньям относятся металлоконструкции, к связям строения – пары трения, подшипники и оси, а к элементам приводов – подшипники, валы и зубчатые передачи. Рукоять карьерного экскаватора, очевидно, относится к основным звеньям.

Структурно-функциональный подход позволяет выделить в структуре любой, в том числе и многодвигательной, машины три функциональ-

ные системы: механическую с силовыми приводами, которая выполняет основные функции машины; систему вспомогательных устройств, служащих для улучшения свойств машины, и систему управления [24].

Подсистемы, входящие в структуру механической системы многодвигательной машины [24]:

- основные исполнительные звенья. К ним относятся элементы, для движения которых предназначена машина. На структурной схеме они обозначаются треугольной рамкой, а неподвижное основание – прямоугольной;

- связи строения. К ним относятся элементы, образующие архитектуру механической системы. Под ними понимаются кинематические пары различных классов и типов и их сочетания, а также кинематические соединения основных звеньев. При снятии этих связей механическая система машины распадается на отдельные звенья [25]. На структурной схеме они обозначаются линиями без стрелок;

- связи функционирования. К ним относятся элементы, обеспечивающие действие системы и ее функционирование; например, приводы основных звеньев, включающие в себя двигатель с силовым редуктором и кинематические цепи передаточных механизмов. При снятии этих связей машина сохраняет свое строение, но не может выполнять свои функции [26]. На структурной схеме они обозначаются линиями со стрелками. Начало линии показывает, на каком звене расположен двигатель.

На рис. 3 представлена структурная схема карьерного экскаватора. В структуре выделены основные звенья – ходовая рама 1, поворотная платформа 2, стрела 3, рукоять 4 и ковш 5. Связи строения соединяют основные между собой – поверхность контакта гусениц с грунтом (*a*), подвижное соединение поворотной платформы с рамой (*b*), а также шарниры, соединяющие стрелу с платформой, рукоять со стрелой и ковш с рукоятью (*c*, *d* и *e* соответственно). Связи функционирования представлены приводами хода (I), поворота платформы (II), напора рукояти (III), поворота рукояти (IV) и ковша (V).

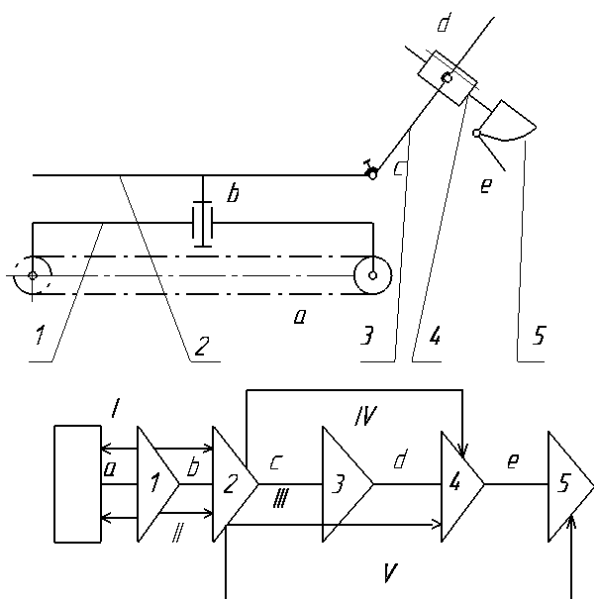


Рис. 3. Карьерный экскаватор: *a* – схема основной кинематической цепи; *b* – структурная схема; 1 – ходовая рама; 2 – поворотная платформа; 3 – стрела; 4 – рукоять; 5 – ковш

Методика расчета ресурса рукояти как функции случайных аргументов

Для некоторых деталей, входящих в состав структурных элементов оборудования, таких как подшипники качения, существуют зависимости для расчета ресурса. Для других деталей эти зависимости могут быть получены на основе известных методов на основании условий их прочности [27].

Средний ресурс рукояти T при условии ее отказа в результате усталостного разрушения зависит от продолжительности цикла нагружения, следовательно, от количества воздействий изгибающего момента в единицу времени.

$$T = \frac{n_{\sigma}}{n}, \quad (1)$$

где n – количество циклов нагружения рукояти в единицу времени, т.е. число циклов экскавации в единицу времени;

n_{σ} – число циклов нормальных напряжений до разрушения рукояти,

$$n_{\sigma} = \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_a} \right)^m \cdot N_G. \quad (2)$$

Зависимость (2) получена из уравнения кривой усталости для условия $\sigma_a \geq \sigma_{-1}$ [27]:

$$\sigma_a^m \cdot n_{\sigma} = \sigma_{-1}^m \cdot N_G, \quad (3)$$

где σ_{-1} – предел выносливости материала рукояти;

σ_a – расчетное или измеренное значение амплитуды нормальных напряжений, зависит от действующих нагрузок и геометрических параметров;

m – показатель наклона левой ветви кривой усталости;

N_G – абсцисса точки перелома кривой усталости.

Данные расчетные формулы позволяют корректировать время межремонтных периодов для рабочего оборудования карьерных экскаваторов с учетом как условий эксплуатации каждой машины, так и влияния производственной программы на ресурс рукояти. Представленные зависимости содержат аргументы, которые характеризуют условия эксплуатации экскаватора, – напряжения, возникающие в рукояти и количество циклов нагружения в единицу времени. Величины этих параметров зависят от усилий, действующих на механизмы экскаватора. Усилия, в свою очередь, обусловлены, в частности, плотностью и крепостью разрабатываемой экскаватором горной массы.

В состав предложенных зависимостей входит переменная, учитывающая количество циклов нагружения в единицу времени и отражающая, таким образом, скорость выполнения экскаватором рабочих операций. Скорость, в свою очередь, обусловлена требуемой в соответствии с производственной программой производительностью, квалификацией персонала и другими изменяющимися факторами [7–11].

Для типового оборудования, эксплуатируемого в схожих условиях, продолжительность межремонтных периодов может быть определена опытным путем. Однако использование карьерных экскаваторов в разных горно-геологических условиях затрудняет применение статистики отказов, накопленной на предприятиях, в других условиях. В этом случае расчет ресурса производится по детерминированной математической модели [12, 27]. Случайная природа факторов (кинематических, силовых, геометрических и др.), влияющих на ресурс, как на случайную величину, при этом не учитывается [27].

Поскольку ресурс – случайная величина, для его определения необходимо помимо математического ожидания вычислять среднее квадратическое отклонение. При наличии информации об отказах задача решается методами математической статистики.

При отсутствии достоверной статистической информации для расчета числовых характеристик ресурса рукояти карьерного экскаватора возможно применение метода линеаризации функций случайных аргументов [28]. Математическое ожидание функции рассчитывается по зависимости

$$m_y = f(m_{x_1}, m_{x_2}, \dots, m_{x_n}), \quad (4)$$

где $m_{x_1}, m_{x_2}, \dots, m_{x_n}$ – математические ожидания аргументов.

Дисперсия и среднее квадратическое отклонение функции определяются по зависимостям:

$$D_y = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)_m^2 D_{x_i} + 2 \sum_{i < j} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)_m \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \right)_m K_{ij}; \quad (5)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)_m^2 \sigma_{x_i}^2 + 2 \sum_{i < j} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)_m \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \right)_m r_{ij} \sigma_{x_i} \sigma_{x_j}}, \quad (6)$$

где $\left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)_m = f'_{x_i}(m_{x_1}, m_{x_2}, \dots, m_{x_n})$ – производная функции по i -му аргументу;

D_{x_i}, σ_{x_i} – дисперсия и среднее квадратическое отклонение i -го аргумента;

K_{ij} – корреляционный момент i -го и j -го аргументов;

r_{ij} – коэффициент корреляции i -го и j -го аргументов.

Принимая допущение о независимости аргументов друг от друга ($K_{ij} = 0$ и $r_{ij} = 0$), получаем упрощенные зависимости для определения дисперсии и среднего квадратического отклонения функции [14]

$$D_y = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)_m^2 D_{x_i}; \quad (7)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)_m^2 \sigma_{x_i}^2}. \quad (8)$$

Таким образом, зависимости (1) и (2) должны быть дополнены уравнениями для определения дисперсий соответственно ресурса рукояти и числа циклов до ее разрушения:

$$D_T = \left(\frac{1}{n} \right)^2 \cdot D_{n_\sigma} + \left(-\frac{n_\sigma}{n^2} \right)^2 \cdot D_n; \quad (9)$$

$$D_{n_\sigma} = \left(\frac{m}{\sigma_{-1}} \cdot \frac{\sigma_{-1}^m \cdot N_G}{\sigma_a^m} \right)^2 \cdot D_{\sigma_{-1}} + \left(\frac{m}{\sigma_a} \cdot \frac{\sigma_{-1}^m \cdot N_G}{\sigma_a^m} \right)^2 \cdot D_{\sigma_a} + \left(\frac{\sigma_{-1}^m}{\sigma_a^m} \right)^2 \cdot D_{N_G} + \left(\frac{\sigma_{-1}^m \cdot N_G}{\sigma_a^m} \cdot \ln \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_a} \right) \right)^2 \cdot D_m. \quad (10)$$

Расчет ресурса рукояти экскаватора ЭКГ-5А

Для экскаваторов типа ЭКГ-5А, эксплуатирующихся в условиях ГОП ПАО «ММК», в качестве исходных данных при расчете ресурса рукояти принимаются следующие математические ожидания:

$n = 109 \text{ ч}^{-1}$ (при продолжительности цикла экскавации 33 с [15]);

$\sigma_{-1} = 290 \text{ МПа}$ (предел выносливости стали 10ХСНД [29]);

$\sigma_a = 204 \text{ МПа}$ (получено тензометрическими измерениями [15]);

$m = 3,57$ (для стали 10ХСНД [16]);

$N_G = 10^5$ циклов (для стали 10ХСНД [16]).

В соответствии с зависимостями (1) и (2) математическое ожидание ресурса рукояти при таких исходных данных составляет 3218 ч.

Средние квадратические отклонения и дисперсии исходных данных и ресурса рукояти приведены в **табл. 1**. Нулевые значения отклонений приняты для справочных величин.

Другой способ, позволяющий определить аналогичные числовые характеристики, – метод Монте-Карло [21, 30]. Эта методика обеспечивает возможность выполнить машинный эксперимент по измерению величины наработки элемента на основе известных зависимостей для расчета ресурса. Для каждого случайного аргумента, влияющего на значение ресурса, составляется совокупность возможных значений по принятому закону распределения. Далее из каждой совокупности случайным образом выбираются значения, по которым рассчитывается ожидаемый ресурс. После многократного повторения расчета образуется выборка значений ресурса, исследуемая в дальнейшем методами математической статистики.

Для рукояти экскаватора определено математическое ожидание и дисперсия ресурса по методу Монте-Карло. Принято допущение, что каждый из аргументов имеет нормальный закон распределения. По результатам численного экс-

перимента математическое ожидание ресурса составило 3262 ч, дисперсия 7930877, а среднее квадратическое отклонение 2816 ч.

Таблица 1
Числовые характеристики, полученные методом линеаризации

Параметр	Математическое ожидание	Дисперсия	Среднее квадратическое отклонение
$n, \text{ч}^{-1}$	109	4,7	2,2
$\sigma_{-1}, \text{МПа}$	290	0	0
$\sigma_a, \text{МПа}$	204	2025	45
m	3,57	0	0
$N_G, \text{циклов}$	10^5	0	0
$T, \text{ч}$	3218	6426327	2535

Для подтверждения адекватности полученных результатов были обработаны статистические данные о наработках до отказа рукоятей экскаваторов типа ЭКГ-5 в условиях ГОП ПАО «ММК» [15]. Сравнение числовых характеристик ресурса, полученных методами линеаризации и Монте-Карло, со статистическими данными об отказах рукояти приведено в **табл. 2**.

Таблица 2
Сравнение числовых характеристик ресурса, полученных различными методами, с экспериментальными данными

Метод	Математическое ожидание	Дисперсия
Линеаризация	3218	6426327
Монте-Карло	3262	7930877
Статистика отказов	3069	9195012

Сопоставление полученных результатов показывает, что расхождение среднего значения ресурса, определенное методом линеаризации функции случайных аргументов, превышает среднестатистическое значение на 4,8%. Математическое ожидание, полученное методом Монте-Карло, также несколько выше статистического значения, расхождение составляет 6,2%. Некоторое превышение расчетными значениями статистических связано с наличием в статистических данных наработок до отказов, вызванных не усталостным разрушением, а другими причинами. Например, к таким отказам относится мгновенное разрушение рукояти в результате действия нагрузки, превышающей предел прочности материала. Предлагаемые расчетные методики не учитывают отказы подобного характера.

Расхождение расчетных средних квадратических отклонений со статистическим составляет 16 и 7% соответственно для методов линеаризации и Монте-Карло. При этом среднее квадратическое отклонение, определенное по статистическим данным, превышает расчетные значения. Это также связано с наличием в статистической выборке наработок до отказов, вызванных случайными событиями, не связанными с усталостным разрушением рукояти.

Заключение

Метод линеаризации отражает как физическую природу возникновения отказов, так и их случайный характер и является приемлемым для оценки надежности горнотранспортного оборудования. Помимо оценки показателей надежности существующего и эксплуатируемого оборудования, он может применяться на стадии проектирования, т.к. не требует проведения экспериментов. Разброс значения ожидаемого ресурса при этом получается несколько большим, чем при расчете методом Монте-Карло. Это ведет к занижению гамма-процентного ресурса (при $\gamma < 50\%$), т.е. дает более осторожный прогноз, что позволяет снизить риск возникновения отказа.

Другим преимуществом метода линеаризации является возможность оценить степень влияния рассеяния каждого из аргументов на дисперсию функции. Это позволяет отказаться от учета разброса некоторых величин в случае, если их влияние на результат незначительно. В этом случае расчетная дисперсия ресурса принимает несколько меньшее значение, чем при учете дисперсий всех аргументов. При этом расхождение между методами линеаризации и Монте-Карло уменьшается.

Таким образом, представленный структурно-функциональный подход позволяет осуществлять научно обоснованную декомпозицию горного оборудования. Такая декомпозиция дает возможность группировать элементы со схожей природой возникновения отказов и рассчитывать показатели их надежности. Разработанная методика позволяет определить числовые характеристики ресурса деталей, работающих в условиях знакопеременных нагрузок. Она применима как для карьерных экскаваторов, так и другого горнотранспортного оборудования, дает возможность учитывать условия его эксплуатации. Адекватность предложенных математических моделей подтверждается сходностью результатов расчета с результатами машинного эксперимента по методу Монте-Карло и статистическими данными о наработках до отказа.

Список литературы

1. Моделирование и оптимизация режимов работы горных машин с использованием среды Matlab / В.С. Великанов, И.Г. Усов, А.А. Абдрахманов, И.И. Усов // Горный журнал. 2017. №12. С.78–81.
2. Олизаренко В.В. Основы эксплуатации горных машин и оборудования. Магнитогорск: МГТУ им.Г.И.Носова, 2008. 188 с.
3. Оптимальное динамическое управление сроком эксплуатации горных машин. Ч.I. Модели с интервалом неограниченной продолжительности / С. Вуйич, В. Зайич, И. Милянвич, А. Петровски // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2010. №4. С.66–74.
4. Модельные подходы к оценке жизненного цикла вспомогательных машин на примере угольного карьера в Сербии / Д.Я. Крунич, С. Вуйич, М. Танасиевич, Б. Димитриевич, Т. Шубаранович, С. Илич, С.Максимович // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2018. №3. С.51–61.
5. Расчет ресурса деталей структурно-функциональных элементов горных машин / О.Р. Панфилова, В.С. Великанов, И.Г. Усов, Е.Ю. Мацко, И.М. Кутлубаев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2018. № 2. С. 43–51.
6. Герики Б.Л., Герики П.Б., Козловский Г.И. Диагностика горных машин и оборудования. М.: ИПО «У Никитских ворот», 2012. 400 с.
7. Летова Т.И., Петин С.В. Оценка усталостной долговечности крестообразных сварных соединений, передающих нагрузку // Инженерно-строительный журнал. 2013. №3 (38). С.51–58.
8. Petinov S.V., Guchinsky R.V. Fatigue assessment of ship super-structure at expansion joint // Transactions of the Royal Institution of Naval Architects Part A: International Journal of Maritime Engineering. 2013. Т. 155. №A4. С. A201-A209.
9. Guchinsky R.V., Petinov S.V. Fatigue design of expansion joint in ship superstructure // Proceedings of the International Summer school-conference «Advanced problems in mechanics 2013» 2013. С. 420–431.
10. Прогнозирование усталостной долговечности металлов с учетом неоднородности микроструктуры / Р.В. Гучинский, С.В. Петин, Ш. Сиддик, М. Имран, Ф. Вальтер // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2015. № 4 (231). С. 134–143.
11. Petinov S.V., Guchinsky R.V., Sidorenko V.G. The damage identity in fatigue assessment of structures // Инженерно-строительный журнал. 2016. №1 (61). С.82–88.
12. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Брауни и др. М.: Машиностроение, 2003. 576 с.
13. Машиностроение. Энциклопедия. Т IV-3. Надежность машин / В.В. Ключев, В.В. Болотин, Ф.Р. Соснин и др. М.: Машиностроение, 2003. 592 с.
14. Халикова О.Р. Методология построения и ведения базы данных металлургического оборудования: дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск, 2009. 128 с.
15. Шарипов Р.Х. Изучение влияния скорости подъема ковша на долговечность рукояти с зубчато-реечным напором (на примере ЭКГ-5А): дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2011. 131 с.
16. Ракицкий А.А. Исследование усталостной прочности деталей машин с термонапыленными порошковыми покрытиями в условиях циклического растяжения / сжатия // Вестник Барановичского государственного университета. Серия: Технические науки. 2016. №4. С. 62–67.
17. Ракицкий А.А. Прогнозирование эксплуатационного ресурса конструкций мобильных машин по результатам рандомизированных стендовых испытаний // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В: Промышленность. Технические науки. 2016. №3. С.38–43.
18. Velikanov V.S., Dyorina N.V., Panfilova O.R. Stability of a mine excavator with a variable cab position // MATEC WebConf., 224 (2018) 02010. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822402010>
19. Antsupov A.V., Antsupov A.V., Antsupov V.P., Designed assessment of machine element reliability due to efficiency criteria // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. №5 (45). С. 62–66.
20. Структурное представление многодвигательных машин для определения показателей надежности / И.М. Кутлубаев, А.Н. Макаров, И.Г. Усов, О.Р. Панфилова // Современные методы конструирования и технологии металлургического машиностроения: междунар. сб. науч. тр. / под ред. Н.Н. Огаркова. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. С. 83–87.
21. Электронная база данных для организации технического обслуживания и ремонта металлургического оборудования / И.М. Кутлубаев, А.Н. Макаров, И.Г. Усов, О.Р. Халикова // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2008. №3. С.37–41.
22. Макаров А.Н., Халикова О.Р. Оценка ожидаемого ресурса подшипников с учетом случайной природы условий эксплуатации // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2008. №11. С.43–45.
23. Горные и строительные машины: [Электронный ресурс] / В.С. Великанов, И.Г. Усов, Е.Ю. Мацко, О.Р. Панфилова. Магнитогорск, 2018. Т. 2.
24. Макаров А.Н. Теоретические основы построения, методы расчета и конструирование манипуляционных устройств металлургического производства: дис. ... д-ра техн. наук. Магнитогорск, 1996. 350 с.
25. Макаров А.Н., Кутлубаев И.М., Усов И.Г. Основы механики многодвигательных машин. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2006. 194 с.
26. Макаров А.Н., Кутлубаев И.М. Синтез структур многодвигательных машин с кинематической развязкой движения основных исполнительных звеньев // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2006. №1 (13). С.37–42.
27. Машиностроение. Энциклопедия. Т.IV-1. Детали машин Конструкционная прочность. Трение, износ, смазка / гл. ред. Д.Н. Решетов. М.: Машиностроение, 1995. 864 с.
28. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: учеб. для вузов. М.: Высш. шк., 2002. 575 с.

29. Петин С.В., Гучинский Р.В. О расчетах долговечности трубчатых конструкций (англ.) // Инженерно-строительный журнал. 2013. №1 (36). С.39–47.
30. Крамаренко Т.Г. Особливості вивчення методу Монте-

Карло в теорії ймовірностей та математичній статистиці // Новые компьютерные технологии. 2016. Т. 14. №1 (14). С. 28–29.

Поступила 26.11.18

Принята в печать 03.12.18

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-17-24>

ANALYSIS OF THE DIPPER HANDLE DURABILITY INDICATORS

Vladimir S. Velikanov – PhD (Eng.), Associate Professor, Professor
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Olga R. Panfilova – PhD (Eng.), Associate Professor
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: halikova@inbox.ru

Igor G. Usov – PhD (Eng.), Associate Professor
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. This paper considers the issue of predicting the reliability parameters of the dipper handle. Durability – or, mean life – was taken for the main indicator of reliability. The aim of this research was to substantiate the calculated dependences that help determine the numerical characteristics of the dipper handle life by means of physical reliability theory. The authors developed formulas to calculate the average handle life on the basis of measured or calculated loads and, consequently, the stresses arising in the handle. The latter are represented by a random value, which reflects the operating conditions of mining excavators and determines the random nature of the handle life. Accordingly, it was necessary to estimate possible deviation of the service life value from the average value. To estimate the spread of the service life values, the authors proposed a method for calculating the dispersion and the mean square deviation by linearization of the random arguments function. This resulted in a method for calculating the numerical values of the dipper handle life accounting for the random nature of this parameter, as well as the changing operating conditions. The authors provide an example of calculated service life of the EKG-5A excavator handle. The measured stresses experienced by the dipper handles at the mining site of Magnitogorsk Iron and Steel Works were taken as the initial data for the calculations. The authors used similar data to carry out a numerical computer experiment following the Monte Carlo method. The numerical characteristics of the dipper handle life determined through linearization of the random arguments function and by the Monte Carlo method prove to be consistent with the respective statistics referring to the mine excavators operated by the mining site of Magnitogorsk Iron and Steel Works.

Keywords: Reliability, durability, life, excavator, handle, failure, stresses.

References

1. Velikanov V.S., Usov I.G., Abdrakhmanov A.A., Usov I.I. Modeling and optimization of mining machine operation modes with MATLAB. *Gornyj zhurnal* [Mining journal]. 2017, no. 12, pp. 78–81. (In Russ.)
2. Olizarenko V.V. *Osnovy ehkspluatacii gornyh mashin i oborudovaniya* [Basic operation of mining machinery and equipment]. Magnitogorsk: NMGTU, 2008, 188 p. (In Russ.)
3. Vujich S., Zajich V., Milyanovich I., Petrovski A. Optimal dynamic management of the operating life of mining machinery. Part I. Models with an interval of unlimited duration. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh* [Physical and technical problems of mining]. 2010, no. 4, pp. 66–74. (In Russ.)
4. Krunich D.Ya., Vujich S., Tanasievich M., Dimitrievich B., Shubarovich T., Ilich S., Maksimovich S. Simulation approaches to assessing the life cycle of auxiliary machines with the case study of a coal mine in Serbia. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh* [Physical and technical problems of mining]. 2018, no. 3, pp. 51–61. (In Russ.)
5. Panfilova O.R., Velikanov V.S., Usov I.G., Matsko E.Yu., Kutlubaev I.M. Service life design for the structural and functional elements of mining machines. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh* [Physical and technical problems of mining]. 2018, no. 2, pp. 43–51. (In Russ.)
6. Gerike B.L., Gerike P.B., Kozlovsky G.I. *Diagnostika gornyh mashin i oborudovaniya* [Diagnostics of mining machines and equipment]. Moscow: IPO "U Nikitskikh vorot", 2012, 400 p. (In Russ.)
7. Letova T.I., Petinov S.V. Assessing the fatigue life of cruciform weld joints transmitting loads. *Inzhenerno-stroitelny zhurnal* [Magazine of civil engineering]. 2013, no. 3 (38), pp. 51–58. (In Russ.)
8. Petinov S.V., Guchinsky R.V. Fatigue assessment of ship superstructure at expansion joint. *Transactions of the Royal Institution of Naval Architects Part A: International Journal of Maritime Engineering*. 2013. V. 155. No. A4, pp. A201–A209.
9. Guchinsky R.V., Petinov S.V. Fatigue design of expansion joint in ship superstructure. *Proceedings of the International Summer school-conference "Advanced problems in mechanics 2013"* 2013, pp. 420–431.
10. Guchinsky R.V., Petinov S.V., Siddik Sh., Imran M., Valter F. Predicting the fatigue life of metals taking into account the microstructural heterogeneity. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Saint Petersburg State Polytechnic University]. 2015, no. 4 (231), pp. 134–143. (In Russ.)

11. Petinov S.V., Guchinsky R.V., Sidorenko V.G. The damage identity in fatigue assessment of structures. *Inzhenerno-stroitelnyy zhurnal* [Magazine of civil engineering]. 2016, no. 1 (61), pp. 82–88.
12. Chichinadze A.V., Berliner E.M., Brauni E.D. et al. *Trenie, iznos i smazka (tribologiya i tribotekhnika)* [Friction, wear and lubrication (tribology and tribo-engineering)]. Moscow: Mashinostroenie, 2003, 576 p. (In Russ.)
13. V.V. Klyuev, V.V. Bolotin, F.R. Sosnin et al. *Mashinostroenie. Entsiklopediya. T. IV-3. Nadezhnost mashin* [Mechanical engineering. Encyclopedia. Vol. IV-3. Machine reliability]. Moscow: Mashinostroenie, 2003, 592 p. (In Russ.)
14. Khalikova O.R. *Metodologiya postroyeniya i vedeniya bazy dannykh metallurgicheskogo oborudovaniya: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Methodology: How to build and maintain a database of metallurgical equipment. PhD dissertation]. Magnitogorsk, 2009, 128 p.
15. Sharipov R.Kh. *Izuchenie vliyaniya skorosti podiema kovsha na dolgovечnost rukoyati s zubchato-reechnym naporem (na primere EHKG-5A): dis. ... kand. tekhn. nauk* [Understanding how the bucket lifting speed can impact the durability of the handle with a rack and pinion head (case study of the EKG-5A model): PhD dissertation]. Ekaterinburg, 2011, 131 p.
16. Rakitsky A.A. Fatigue strength of machine parts with thermal spray powder coatings under cyclic tension / compression. *Vestnik Baranovichskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Baranovichi State University. Series: Engineering sciences]. 2016, no. 4, pp. 62–67. (In Russ.)
17. Rakitsky A.A. Predicting the operational life of mobile machines based on the results of randomized bench tests. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V: Promyshlennost. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Polotsk State University. Series B: Industry. Engineering sciences]. 2016, no. 3, pp. 38–43. (In Russ.)
18. Velikanov V.S., Dyorina N.V., Panfilova O.R. Stability of a mine excavator with a variable cab position. *MATEC Web Conference*, 224 (2018) 02010 DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822402010>
19. Antsupov A.V., Antsupov A.V., Antsupov V.P. Designed assessment of machine element reliability due to efficiency criteria. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2013, no. 5 (45), pp. 62–66.
20. Kutubaev I.M., Makarov A.N., Usov I.G., Panfilova O.R. Structural representation of multi-engine machines for defining the reliability indicators. *Sovremennye metody konstruirovaniya i tekhnologii metallurgicheskogo mashinostroeniya: Mezhdunarodnyy sb. nauch. tr. pod red. N.N. Ogarkova* [Advanced design techniques and metallurgical engineering technology: International research papers, ed. by N. N. Ogarkov]. Magnitogorsk: GOU VPO "MGU", 2006, pp. 83–87. (In Russ.)
21. Kutubaev I.M., Makarov A.N., Usov I.G., Khalikova O.R. Electronic database for maintenance and repair of metallurgical equipment. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya* [Repair. Rebuilding. Revamping]. 2008, no. 3, pp. 37–41. (In Russ.)
22. Makarov A.N., Khalikova O.R. Estimating the service life of bearings accounting for the random nature of operating conditions. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya* [Repair. Rebuilding. Revamping]. 2008, no. 11, pp. 43–45. (In Russ.)
23. Velikanov V.S., Usov I.G., Matsko E.Yu., Panfilova O.R. *Gornye i stroitelnye mashiny. Elektronnyy resurs* [Mining and construction machines. E-source]. State registration no. 0321802907. Magnitogorsk, 2018, volume 2. (In Russ.)
24. Makarov A.N. *Teoreticheskie osnovy postroyeniya, metody rascheta i konstruirovaniya manipulyacionnykh ustroystv metallurgicheskogo proizvodstva: dis. ... dokt. tekhn. nauk* [Design of handling machinery for metallurgical application: Theoretical basis and methods. Doctoral dissertation]. Magnitogorsk, 1996, 350 p.
25. Makarov A.N., Kutubaev I.M., Usov I.G. *Osnovy mekhaniki mnogodvigatelnykh mashin* [Basic mechanics of multi-engine machines]. Magnitogorsk: NMGTU, 2006, 194 p. (In Russ.)
26. Makarov A.N., Kutubaev I.M. Synthesized structure of multi-engine machines with kinematics of the key functional elements. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2006, no. 1 (13), pp. 37–42. (In Russ.)
27. *Mashinostroenie. Entsiklopediya. T. IV-1. Detali mashin. Konstruktsionnaya prochnost. Trenie, iznos, smazka* [Mechanical engineering. Encyclopedia. Vol. IV-1. Machine parts. Structural strength. Friction, wear, lubrication]. Editor-in-chief: D.N. Reshetov. Moscow: Mashinostroenie, 1995, 864 p. (In Russ.)
28. Venttsel E.S. *Teoriya veroyatnostey: ucheb. dlya vuzov* [Probability theory: Textbook for university students]. Moscow: Vysshaya shkola, 2002, 575 p. (In Russ.)
29. Petinov S.V., Guchinsky R.V. On calculating the durability of tubular structures (eng). *Inzhenerno-stroitelnyy zhurnal* [Magazine of civil engineering]. 2013, no. 1 (36), pp. 39–47.
30. Kramarenko T.G. Understanding the Monte Carlo method in application to probability theory and mathematical statistics. *Novye kompyuternye tekhnologii* [New computer technologies]. 2016, vol. 14, no. 1 (14), pp. 28–29.

Received 26/11/18
Accepted 03/12/18

Образец для цитирования

Великанов В.С., Панфилова О.Р., Усов И.Г. Анализ показателей долговечности рукояти карьерного экскаватора // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №4. С. 13–20. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-13-20>

For citation

Velikanov V.S., Panfilova O.R., Usov I.G. Analysis of the dipper handle durability. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 4, pp. 13–20. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-13-20>

ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ И УТИЛИЗАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ И ОТХОДОВ

UDC 628.316,628.33,628.34,628.35

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-4-21-29>

METHODS OF SULFATE REMOVAL FROM MINING WASTE WATERS: OVERVIEW

Abdrakhmanova R.N.^{1,2}, Orekhova N.N.², Fischer H.-B.³, Abdrakhmanov R.N.¹,
Nefedjev A.P.¹, Kossov D.Y.⁴

¹ EvroSintez, Magnitogorsk, Russia

² Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

³ Bauhaus-Universität Weimar, Weimar, Germany

⁴ EvroSintez, Moscow, Russia

Abstract

Industrial waste waters rich in heavy metal ions and sulfates are a common phenomenon caused by oxidation of sulfide ore bodies and associated waste. Oxidized products enter a water body leading to a greater number of metal ions, a higher concentration of dissolved salts and a lower pH thus affecting the quality of water. As the environmental impact of sulfates is less detrimental than that of dissolved metals or acidity, the sulfate control has received little attention in many regulatory jurisdictions. It should be noted that the literature on sulfate removal from industrial waste waters is relatively sparse. However, a number of techniques are available to lower the concentration of dissolved ions, including sulfate ions. The sulfate control levels are based on the maximum permissible concentration (MPC) of approximately 100 mg/l for fisheries and on the secondary drinking water recommendations of approximately 500 mg/l. Methods of sulfate removal from industrial waste waters can be of two types: removal through semi-permeable membranes; removal by salt precipitation through ion exchange; permeable reactive barrier; biological recovery or insoluble mineral precipitates. This article offers an overview of the main sulfate removal options for industrial waste waters, as well as a feasibility study comparing the available techniques. The feasibility study suggests that among the techniques available today, biological methods and methods involving chemical reagents offer the most advanced options. An effective low-cost pre-treatment option for sulfates includes lime treatment, which is relevant if the sulfate concentration exceeds 2,000 mg/l. The most suitable option for sulfate removal will be dictated by site-specific conditions of a particular mining operation.

Keywords: removal options, acid mine waters, sulfate ions, reverse osmosis, chemical method, ion exchange, bio-removal.

Introduction

Wastewater treatment with the extraction of valuable components has received much attention in recent years due to it is one of the most important tasks of rational use of natural resources in the mining enterprises activity. It is economically important for the wastewater treatment technology to include the receipt of demanded products and easily recyclable sludges.

The main difficulty is to treat large volumes of technogenic wastewaters. This leads to high economic and material costs in the implementation of various treatment schemes. In addition, wastewater is a complex multi-component system, containing

dissolved metals with high sulfate content, colloids, solid suspended substances of both inorganic and organic origin [1].

Technogenic waste waters are classified in three types: mine, quarry and subsurface. The contamination of technogenic waste waters is primarily due to sulfide minerals oxidation because of their instability in hypergenic conditions. Technogenic waste waters are the most polluted.

Although the environmental impact of sulfate ions is comparably lower than other dissolved pollutants, the sulfate control and mine water conditioning have been given little attention in mining enterprises.

The situation has changed due to reformations in Russian environmental legislation. These changes significantly increase the fees for discharges exceed-

ing the limits, in 25 times instead of 5 to date. The factor of 25 is used in respect of emissions and discharges in excess of established permit limits on emissions and discharges, as well as ultimately permitted emissions (UPE) и normatively permitted discharges (NPD) – if limits are not installed [2,3]. Rivers are water receivers of cleaned waters from mining enterprises. In addition, in recent years, almost all the rivers have been transferred to the category of fishery water reservoirs. It leads to increase the demands on the water cleaning including salt composition.

This review will assess the options available for sulfate removal from mine, subsurface and other types of technogenic waters for conditioning and discuss an economic and technical comparison made between the available technologies.

The article presents the review of existing sulfate removal options for technogenic waste waters.

Technogenic waste waters (TWW) of mining enterprises are classified into: open pit, mine, and subsurface. Open pit acidic waters are formed during construction and operation of pits. Construction and exploitation of mines leads to the formation of mine acidic waters. Subsurface acidic waters contain dissolved minerals leached from sulfide components of the off-grade and off-balance ores, overburden and enclosing rocks. The chemical composition of acidic technogenic waste waters depends on sulfide mineralization of ores such as ferrous, non-ferrous and rare earth metals.

It is known that the following characteristics are common for these waters: low activity values of hydrogen ions ($\text{pH} = 1,5 - 4,5$), high concentrations of sulfur-containing salts of macro- and microelements, high values of redox potential (Eh) [6, 7].

According to their chemical composition, technogenic waste waters do not meet water quality standards of fishery water bodies, including the standard of maximum permissible concentration of harmful substances in waters of fishery water bodies. There are presented three of the main indicators:

- high mineralization (up to 3 g/l), therefore, about 2 million tons of mineral salts are discharged annually into water bodies and rivers;
- pollution with suspended solids (90-110 mg/l), which causes water bodies siltation;
- the increased heavy metal ions content (in 1,5-15 times).

The oxidation processes of sulfide minerals proceed through a complex multistage mechanism, which leads to an increase in acidity and water saturation with heavy metals cations and sulfate anions [27, 46, 48].

Nevertheless, it is found that technogenic waste

waters with high sulfate concentration have a corrosive effect and a high scale potential as well [39].

The article presents the scientific and technical literature review of Russian and foreign authors and the comparative analysis of available sulfate removal technologies from technogenic waste waters.

Sulfate removal methods can be divided into physical, physicochemical, chemical and biological [30, 32, 41–43, 50, 52].

Physical methods

Physical methods include reverse osmosis and its modifications, filtration. These methods have not previously been used for desalination of acidic technogenic waste waters of mining enterprises, but recently the Russian's largest mining and metallurgical company "UMMC – holding" is studying the possibility of using these methods in their enterprises.

The technogenic waste water removal technology based on reverse osmosis which relies on a semi-permeable membrane separating a strong solution and a dilute solution. In this technology, an external hydraulic pressure allows to overcome osmotic pressure, thus forcing water through the membrane receiving two streams [8].

Reverse osmosis is designed for the removal of up to 99% of dissolved organic and inorganic substances, including sulfates.

The advantages of reverse osmosis are: firstly, it does not require using of a traditional reagent-precipitator, such as lime; secondly, receiving water with pollutants concentrations ten times lower than the requirements of maximum permissible concentrations (MPC) for fishery water bodies, thirdly, the possibility of using dilute solution as recycled water in the enterprise production cycle [28, 31, 37, 38, 47].

The disadvantages include:

1. the necessity in pre-removal of suspended particles on micro filters with a pore size of less than 5 microns;
2. low dilute output at each stage and, as a consequence, constructing a series of membrane elements to implement the process and reach 60-75% level of the initial water flow;
3. the limitation of the minimum concentrate volume, which is determined both the apparatus hydrodynamics, and the solubility of salts removed from the water. It should be stressed that scale forming salts can be deposited on the membranes surface and lead to a decrease in productivity, membrane elements corrosion and membrane surface fouling by mineral deposits of insoluble salts (alkaline earth metals carbonates, calcium sulfate in the gypsum form);

4. application of antiscaling agents for prevention of crystalline salts deposit formation on the membrane surface;

5. the problem of brine disposal, which is formed during the division of technogenic waste water into two streams and containing pollutants in concentrations significantly exceeding the water quality standards of fishery water bodies, including standards of MPC of harmful substances in waters of fishery water bodies [9, 10].

The following method for sulfate removal is filtration, which is used to extract fine-dispersed substances at the stage of deep removal (post-treatment) of technogenic waste waters after physicochemical or biological treatment, consisting in the separation of suspensions using porous partitions or granular layers, which separate the dispersed phase and pass the liquid.

The following filtering processes are used in the practice of technogenic waste water treatment [25]:

- filtration through filter walls;
- filtration through granular layers;
- microfiltration.

The advantages of filtering are:

1. obtaining filtrate that meets the requirements for the content of solid insoluble substances;
2. complete passage of filtrate through the filter screen in comparison with reverse osmosis;
3. the applicability of the filtration as one of the stages in technological water removal process.

The disadvantages include:

1. the process duration;
2. obtaining filtrate with high metal and sulfate content.

Physicochemical methods

Physicochemical methods include electrodialysis, ion exchange [33].

In electrodialysis an external direct current and a stack of alternating cation and anion selective membranes are applied to extract the salts from technogenic waste water. In this electro-membrane process anions and cations are attracted to the anode and to the cathode. Cations and anions are concentrated between cation-impermeable barrier and anion-impermeable membranes.

Advantages of electrodialysis are, 1. this process does not require additional reagents for its implementation; 2. processability: the electrodialyzers provide ease of maintenance and reliability in operation; 3. low power consumption; 4. the system is not sensitive to effluent temperature or pH; 5. the recyclability of extracted components to the production; 6. Capital costs are reduced due to lower working pressures.

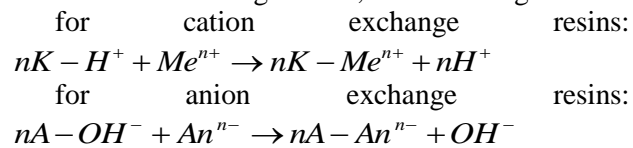
Disadvantages: 1, the concentration polarization, leading to the salts deposition on the membrane surface, which leads to lower treatment efficiency; 2, the low intensity.

Periodic (approximately every 15 minutes) switching of the current polarity greatly improves electrodialysis. The reverse electrodialysis reduces fouling and facilitates membrane regeneration.

Nevertheless, insufficient pre-treatment may occur a large amount of calcium sulfate deposition on the electrodes [11].

The ion exchange method (IEM) allows to clean technogenic waste waters by means of absorption of positive or negative ions of "pollution" by ion exchange resins in exchange for an equivalent amount of hydrogen protons and hydroxyl anions of ionite [12, 33].

The basic equations of ion exchange, schematically describing the reaction of the interaction of ions with ion exchange resins, the following:



Thus, by means of ion exchange, technogenic waste water is cleaned from heavy metal ions (Zn^{2+} , Cr^{3+} , Hg^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+}), including alkaline earth metal ions (Mg^{2+} , Ca^{2+}), ammonia salts and anions (Cl^- , SO_4^{2-} , CNS^- , CN^- etc.).

The ion exchange technology can be used to treat solutions with sulfate up to 2000 mg/L.

The advantage of the IEM allows to achieve the content of pollutants to the maximum permissible concentration.

The advantage of the ion exchange method: it has been designed to reduce gypsum levels in effluent thereby achieving the maximum permissible concentration of total dissolved solids and reducing corrosion potential.

The disadvantages of ion exchange are: 1. significant consumption of aggressive reagents for regeneration; 2. the operating costs, increasing in proportion to the salinity of technogenic waste waters; 3. high costs of recycling solutions.

Chemical methods

Chemical methods include lime treatment, barium-containing and aluminum-containing reagents.

Lime treatment is a traditional technology for technogenic waste water treatment plants, based on neutralization with the production of complex precipitation containing metal hydroxides and calcium sulfate in the form of gypsum [34, 36, 44, 49]. This

method provides only partial cleaning of technogenic waste waters from sulfate ions. It should be stressed that the concentration of sulfates in the cleaned water exceeds the MPC of the fishery water bodies value by 15–20 times.

The advantages of lime treatment is the simplicity of the cleaning process and reagent availability.

The disadvantages include: 1. the insufficient degree of cleaning of acid technogenic waste waters from heavy metal ions; 2. a large amount of multi-component sludge, 3. the necessity of an additional cleaning stage from trace heavy metal ions and sulfates.

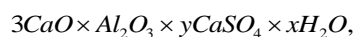
Barium salts such as $BaCl_2$, $BaCO_3$ are used to reduce sulfates concentration in technogenic waste waters up to 100 mg/L [13, 40, 53]. Barium hydroxide $Ba(OH)_2$ [14] is proposed as an complex reagent because of its good solubility and strong alkaline reaction. According to stoichiometry the sulfate concentration from 380 to 75 mg/dm³ can be reduced with 0.54 g $Ba(OH)_2$.

The advantages are: 1. all barium-containing reagents can remove sulfates from waste waters from high levels to within regulatory standards; 2. acidic waste waters can be treated directly with BaS and $Ba(OH)_2$; 3. during the cleaning process valuable products are created.

The main disadvantages are that barium compounds are very toxic and the high cost of barium containing reagents.

Sulfate removal through the precipitation of ettringite can be realized by means of aluminum-containing reagents.

The mechanism of the chemical process include many stages. The first stages is the interaction of aluminate anion in an alkaline medium with calcium ions producing various hydrated forms of calcium aluminate. This compound interacts with sulfate ions [19, 20, 21, 22, 23, 24]. The product of this reaction is the complex sulfate containing precipitate in the form of calcium hydro-sulfur-aluminate (CHSA):



$$2\partial e y = 1 \div 3, \quad x = 12 \div 32$$

The resulting calcium hydro-sulfur-aluminate precipitations are insoluble and non-toxic compounds. The undoubted advantage of this method is the receiving valuable product which can be used as a raw material in the building materials production [4]. The disadvantage of the method is the high pH value of water (above 12.0), which requires carbonization stage to reduce the pH of cleaned water.

Biological methods

Anaerobic conditions allow to remove sulfate from technogenic waste waters as stable sulfide containing precipitates. The process of sulfate reduction is brought about by strictly anaerobic bacteria of two genera: *Desulfovibrio* spp. (five species) and *Desulfotomaculum* spp. (three types). These organisms use reductive sulfur compounds (sulfate, sulfite, etc.) in a respiratory metabolism generating hydrogen sulfide [5]. Suitable conditions for the implementation of a sulfate reduction system can be made in flooded underground mine workings and open pits.

Biological sulfate reduction include oxidation of organic substances generally short chain organic acids and the destruction of phosphates, nitrates, ammonium ions. As a result, hydrogen sulfide reacts with dissolved metal ions, forming insoluble sulfide salts [15, 26, 29, 35, 45, 51].

This process requires a bioreactor [16, 17, 18], with maintaining correct conditions to sustain bacterial activity. To improve the efficiency of treatment, it is necessary to strictly control the flow rate of cleaned technogenic waste water.

Dill et al. investigated the practical application of bioreactors in the current production. As a result, it was found that the content of sulfate ions decreased from 3000 mg/l to 250 mg/l for 70 h [16].

The advantages of the biotechnological method are: 1. the process does not require reagents for its implementation; 2. reducing the concentration of heavy metal ions and sulfates up to the MPC requirements.

The disadvantages of biological treatment are: 1. duration; 2. complexity of hardware design; 3. control for the temperature and flow rate of cleaned technogenic waste water, as well as the addition of reducing substances.

Evaluation of treatment options for sulfate removal

The criteria for implementation one of the sulfate removal options depend on the ability of the technology to remove sufficient sulfates in a given time, the effectiveness and economic parameters of technogenic waste water treatment from polluting ions, discharge of the treated water meets the water quality standards of water bodies of fishery importance.

Table 1 presents data on the economic evaluation of capital and operating costs for the treatment of 1000 m³ of technogenic waste waters per day. It is established that the use of reverse osmosis is characterized by the highest operating costs for water cleaning in comparison with reagent methods.

In conclusion, it should be noted that currently the most popular are reagent-free methods, namely membrane and ion exchange technologies. However, the use of these methods to clean large volumes of technogenic waste waters is constrained by technical and economic indicators: high capital and operating costs and not fully solved environmental problems associated with waste disposal.

Based on the fact that, at present, almost all mining and processing enterprises use the traditional and economical method of cleaning (liming) with an increase in pH of water to 9-11, the reagent sulfate removal technology is suitable by deposition in the ettringite composition ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$), proposed in 1999 by J. R. Smith and the SAVMIN process [50] (Fig. 1).

The process involves three successive stages: at the first stage heavy metal ions removal in the form of hydroxides by adding lime to pH 12. At the second stage the removal of gypsum by fractional crystallization and the addition of aluminum hydroxide to form insoluble ettringite. At the final stage, to reduce the pH, carbon dioxide is added and pure calcium carbonate is precipitated. The ettringite may be further disposed or dissolved in the sulfuric acid for the regeneration of aluminum hydroxide. The technology was successfully tested in South Africa, during which 500 m³ of water with an initial sulfate concentration of 800 mg/l was recycled, further reduced to values of less than 200 mg/l. [3]

Despite the attractiveness of the technology, today its use is not economically justified. Consequently, it is important to adapt the technology for mining enterprises.

Attempt at such adaptation was made by "Ev-roSintez" Ltd in the enterprise of "Mednogorsky copper-sulfur combine" Ltd located in the Orenburg region, the treatment technology of technogenic waste waters, suggests in our opinion the following steps.

At the first step, the retention of the liming stage, which consists in simultaneously and effectively reducing the content of heavy metal ions and sulfate ions. The content of sulfate ions after first stage varies between 1,300 and 1,100 mg/l.

In the second stage, wastewater is treated to obtain a stable high-sulfate containing form of ettringite suitable for use in the construction industry.

One of the limiting factors in the stable type of ettringite formation is the hydrogen index maintenance at the level of 12.5 units during the entire process of deep sulfate removal to values less than 100 mg/l.

Future research will include the calculation of the thermodynamic conditions for the ettringite formation with high and low sulfate content; determination the stability limits of the various ettringite forms; the thermodynamic calculations of the formation ettringite compounds containing various anions and the kinetics of ettringite formation.

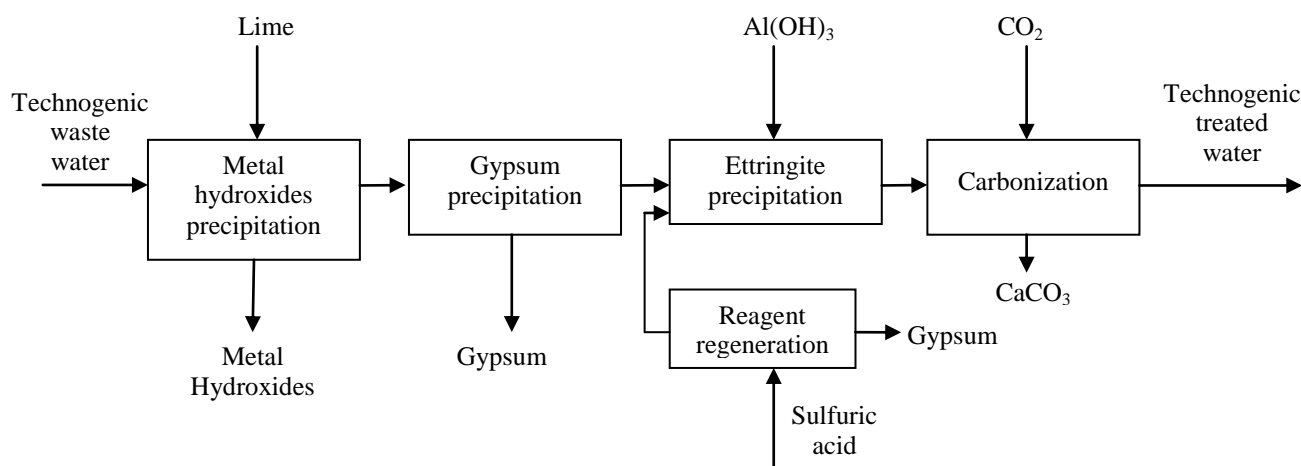


Figure 1. The SAVMIN-process

Table 1

Comparative analysis of existing sulfate removal options for technogenic waste waters and with reagents of “Evrosintez” Ltd

Parameter	Options											
	Reverse osmo- sis		Filtration		Reagent options						Bioreactor	
					Limestone/ Lime		BaS		Reagents of “Evrosintez” Ltd			
Pretreatment	Yes		Yes		No		No		No		Yes	
Feed water sulfate limits	Any		Any		Any		Any		Any		Any	
Sulfate removal, %	> 99		> 95		50		> 98		> 99		> 90	
Brine production	Yes		Yes		No		No		No		No	
Sludge production	low		moderate-high		Low-moderate		Low-moderate		moderate-high		Low-moderate	
Monitoring	Low-moderate		moderate-high		moderate-high		high		moderate-high		moderate-high	
Maintenance	high		high		low		low		moderate		moderate	
Capital cost, <i>RUB/per10³m³/day</i>	£ 0.46 M	37.8	£ 0.14 M	11,5	£ 0.13 M	10,2	£ 0.25 M	19.8		10,2	£ 0.18 M	14.3
Operating cost, <i>RUB/m²</i>	£0.49	40.3	£0.15	11.9	£0.13	10.2	£0.27	21.4		50	£0.2	15.8
Advantages	drinking water quality		drinking water quality		- trace metal removal; - very cheap		- utilization of <i>H₂S</i> and <i>CO₂</i> ; - recycling of expensive <i>BaS</i>		- sulfate re- moval up to 100 mg/l;		trace metal re- covery; recycling of <i>H₂S</i> and <i>CO₂</i> ;	
Disadvantages	- scaling prob- lems; - short mem- brane life - production of sludges		- scaling prob- lems; - production of sludges - limited sul- fate removal		- limited sulfate removal; - production of sludges		- little trace metal removal; - production of sludges		- production of sludges		- cost of C + energy source; - production of sludges	
Improvements	Not suitable for large water volumes		-		- sludge recy- cling		- sludge recy- cling		- sludge recy- cling		- - sludge recy- cling; -specific design required	

Conclusions

Sulfate removal from technogenic wastewaters is considered to be of secondary importance compared to removal of metals and acidity. As such, it is worth noting that methods for sulfate removal up to 100 mg/dm³ have not yet been implemented in industrial practice, because of technical and economic acceptability.

Various options for sulfate removal were compared in economic and technical aspects. The presented comparison of sulfate removal options

proved that most of them are not suitable for wastewater disposal of mining enterprises. Electrofiltration methods are considered to be more attractive to treat technogenic waste waters up to 1000 m³/day for economic reasons. However, reagent methods are more realistic for implementation because of the presence of capacitive structures at mining enterprises for collection and accumulation of huge water volumes. Nevertheless, some limitations of reagent methods are worth noting, i.e. relatively inexpensive technical reagents and optimization of the process kinetic.

References

1. Federal Law No. 219-FZ dated July 21, 2014, "On amendments to the Federal Law "On Environmental Protection" and certain legislative acts of the Russian Federation". (In Russ.)
2. Environmental impact charge: Calculation and collection rules, enacted by the decree No. 255 of the RF Government dated March 3, 2017. (In Russ.)
3. Masloboev V.A. Vigdergauz V.E. et al. Techniques for reducing the concentration of sulfates in mining wastewater. *Vestnik Kolskogo nauchnogo tsentra RAN* [Bulletin of Kolsky Science Centre of the Russian Academy of Sciences]. 1/2017 (9), pp. 99-115. (In Russ.)
4. Abdrakhmanova R.N., Orekhova N.N., Nefediev A.P. Understanding how to apply a double-action reagent to remove sulfates from the water and obtain an additional product. *Sovremennye problemy kompleksnoy pererabotki trudnoroobratimyykh rud i tekhnogenennogo syrya (Plaksinskie chteniya – 2017): materialy Mezhdunarod. Nauch. Konf.* [Current problems in the comprehensive processing of complex ores and manmade materials (Plaksin Readings-2017): Proceedings of the International Science Conference], Krasnoyarsk, 12-15 September 2017. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2017, 452 p. (In Russ.)
5. Chappelle, F.M. 1993 Groundwater Microbiology and Geochemistry. Prentice-Hall.
6. Emlin E.F. *Tekhnogenez kolchedannykh mestorozhdeniy Urala* [Technogenesis of the pyrite deposits of the Urals]. Sverdlovsk: Publishing House of the Ural University, 1991. (In Russ.)
7. Shulenina Z.M., Plaul P. Acid drainage. *Global Studies: Encyclopedia*. Moscow: Raduga, 2003, pp. 440-442. (In Russ.)
8. Dytner'sky Yu.I. Reverse osmosis and ultrafiltration. Moscow: Khimiya, 1978, 352 p. (In Russ.)
9. Kucera J. Reverse Osmosis. Industrial applications and processes. 2010, p. 393.
10. Pulles W., Juby G.J.G., and Busby R.W. 1992 Development of the Slurry Precipitation and Recycle Reverse Osmosis Technology for desalination technogenic waste waters. *Water Science & Technology*, 25, 25 pp.
11. Juby G.J.G. and Pulles W. 1990. Evaluation of Electrodialysis reversal for desalination of blackish mine water. WRC Report 179/1/90.
12. Helfferich F. 1962 Ion Exchange. McGraw-Hill, San Francisco: 624 pp.
13. Adlem C.J.L. 1997 Treatment of sulfate-rich effluents with the barium sulfide process. MSc. thesis. University of Pretoria, South Africa.
14. Adlem C.J.L., Maree J.P., and Pleiss P.Du. 1991. Treatment of sulfate-rich mining effluents with the Barium Hydroxide process and recovery of valuable by-products. In.: 4th International Mine Water association Congress, Ljubljana (Slovenia) – Portschach (Austria), September 1991, pp. 211–221.
15. Frank Yu.A., Lushnikov S.V. Biochemical potential of sulfate-reducing bacteria. *Ekologiya i promyshlennost* [Ecology and industry], 2006, no. 1, pp. 10-13. (In Russ.)
16. Dill S., Du Preez L., Graff M. and Mare J. 1994 Biological sulfate removal from acid mine drainage utilizing producer gas as carbon and energy source. 5th International Mine Water Congress, September 1994, pp. 631–641.
17. Henze M., Herremoes P., La Cour-Jansen., Arvan E. *Ochistka stochnykh vod. Biologicheskie i khimicheskie protsessy* [Wastewater treatment. Biological and chemical processes]. Moscow: Mir, 2004. (In Russ.)
18. Morozova K.M. Biological wastewater treatment systems: Design principles. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* [Water supply and sanitary engineering], 2009, no. 1. (In Russ.)
19. Kim M.P., Molodchik G.L. *Sposob ochistki stochnykh vod ot sulfat-ionov* [Technique for removing sulfate-ions from wastewater]. Patent RF, no. 2236384. Applied: 2003. Published: 2004. (In Russ.)
20. Kim M.P., Molodchik G.L., Agapov A.E., Azimov B.V., Navitny A.M. *Sposob ochistki stochnykh vod ot sulfat-ionov* [Technique for removing sulfate-ions from wastewater]. Patent RF, no. 2322398. Applied: 2006. Published: 2008. (In Russ.)
21. Kim M.P., Molodchik G.L., Agapov A.E., Azimov B.V., Navitny A.M. *Sposob ochistki stochnykh vod ot sulfat-ionov* [Technique for removing sulfate-ions from wastewater]. Patent RF, no. 2323164. Applied: 2006. Published: 2008. (In Russ.)
22. Grishin V.P., Makarov O.V., Nekryachenko S.G. Pat. *Sposob ochistki stochnykh vod ot sulfat-ionov* [Technique for removing sulfate-ions from wastewater]. Patent RF, no. 2559489. Applied: 2014. Published: 2015. (In Russ.)
23. Kim M.P., Molodchik G.L. *Sposob ochistki stochnykh vod ot sulfat-ionov* [Technique for removing sulfate-ions from wastewater]. Patent RF, no. 2233802. Applied: 2003. Published: 2004. (In Russ.)
24. Nurkeev S.S., Ozerov A.I., Kospanov M.M., Musina U.Sh. *Sposob ochistki stochnykh vod ot sulfat-ionov* [Technique for removing sulfate-ions from wastewater]. Patent USSR, no. 1724597 A1. Applied: 1989. Published: 1992. (In Russ.)
25. Buchanan J. 1987 Basics of filtration. *Water Sewage & Effluent*. September 1987; 35-36.
26. Chappelle F.M. 1993 Groundwater Microbiology and Geochemistry. Prentice-Hall.
27. Cravotta C.A. III 1994 Secondary iron-sulfate minerals as sources of sulfate and acidity. In: *Environmental Geochemistry of Sulfate Oxidation* (eds. C.N. Alpers and D.W. Blowes). American Chemical Society Symposium Series, 550. 1994. 345-364.
28. Du Pleiss G.H. and Swartz J.A. 1992 Tubular Reverse Osmosis treatment of Secunda mine water: a pilot plant investigation. *Water Science Technology*, 25, 193-201.
29. Du Preez L.A., Maree J.P., and Jackson-Moss C.A. 1992 Biological sulfate removal from industrial effluents. *Environmental Technology*, 13: 875-882.
30. Eckenfelder W.W. 1989 Industrial Water Pollution Control. McGraw Hill, 400 p.
31. Eriksson P. 1988 Nanofiltration extends the range of membrane filtration. *Environmental Progress*, 7: 58-62.
32. Everitt D.J., Du Plessis J. and Gussman H.W. (1994) The removal of salt from underground technogenic waste waters. *Mining Environmental Management*, March 1994: 12-14.
33. Feng D., Aldrich C., and Tan H. 2000. Treatment of acid mine water by use of metal precipitation and ion exchange. *Minerals Engineering*, 13(6), 623-642.
34. Geldenhuys A.J., Maree J.P., de Beer M. and Hlabela P. 2001 An integrated limestone/lime process for partial sulfate removal. *Proceedings of Environmentally Responsible Mining in South*

- Africa, September 2001. CSIR, Pretoria, South Africa.
35. Gould W.D., Bechard G. and Lortie L. 1994 The nature and role of microorganisms in mine drainage. In: Environmental Geochemistry of Mine Waste, (eds: J.L.Jambor and D.W. Blowes). 185-199, MAC.
36. Gussman H.W. and Nagy P. 1993 The development and operation of the GYPCIX pilot plant, JCI MPRL, Johannesburg, SA, July 1993.
37. Harries R.C. 1985 A field trial of Seeded Reverse Osmosis for desalination of a scaling type mine water. Desalination, 56: 227-236.
38. Juby G.J.G. 1989 Membrane desalination of mine water. WISA Conference. March 1989.
39. Kleinmann R.L.P. and Pacelli R.R. 1991 Biogeochemistry of acid mine drainage. Mining. Engineering, 33, 300-6.
40. Kun L.E. 1972 A report on the reduction of the sulfate content of acid mine drainage by precipitation with barium carbonate. Anglo American Research Laboratories. D/3/W/1.
41. Lorax 2003 A review of sulfate treatment. Report to INAP by Lorax consultants. Electronic document, INAP website.
42. Marree J.P. 1989 Sulfate removal from Industrial effluents. PhD thesis. University of the Orange Free State.
43. Maree J.P., Bosman D.J. and Jenkins G.R. 1989 Chemical removal of sulfate, calcium and metals from mining and power station effluents. Water Sewage and Effluent, 9: 10-25.
44. Marree J.P. and Du Plessis P. 1994 Neutralization of acid mine water with calcium carbonate. Water Science & Technology, 29: 285-296.
45. Marree J.P., Hulse G., Dods D. and Schutte C.E. 1991 Pilot plant studies on biological sulfate removal. Water Pollution Research and Control, part 3. CSIR.
46. Nordstrom D.K. 1982 Aqueous pyrite oxidation and the consequent formation of secondary minerals. In: Acid Sulfate Weathering, 37-56. Soil Science Society of America.
47. Pulles W., Juby G.J.G., and Busby R.W. 1992 Development of the Slurry precipitation and Recycle Reverse Osmosis Technology for desalinating technogenic waste waters. Water Science & Technology, 25. 25 p.
48. Robins R.G. et al. 1997 Chemical, physical and biological interaction at the Berkerley Pit, Butte, Montana. Tailings and Mine Waste 97. 529-541. Balkema, Rotterdam.
49. Robertson A.M., Everett D., Du Plessis P. 1993 Sulfate removal by GYPCIX process following lime treatment. In: SUPERFUND XIV Conference, 30/11-2/12/93, Washington USA.
50. Smit J.P. 1999 The cleaning of polluted mine water. Proceedings of the International Symposium on Mine Water & Environment for the 21st Century, Seville, Spain.
51. Trudinger A., Chambers L.A., and Smith J.W. 1985 Low temperature sulfate reduction: biological versus abiological. Canadian Journal of Earth Sciences, 22, 1910-1918.
52. Trusler G.E., Edwards R.I. Brouckaert C.J., and Buckley C.A. 1988 The chemical removal of sulfates. Proceedings of the 5th National Meeting of the South African Institute of Chemical Engineers, Pretoria, W3-0-W3-11.
53. Wilsenbach I. 1986 Cost estimate for barium sulfate reduction. Internal report of the Division of Water Technology, CSIR, 620/2616/6.
54. Abdrakhmanova R.N., Nefedjev A.P., Abdrakhmanov R.N. Overview of methods for removing sulfates from mine waters. *Actual problems of mining*, 2018, no. 5, pp. 38-43. (In Russ.)

Received 18/06/18

Accepted 23/07/18

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ НА РУССКОМ

УДК 628.316,628.33,628.34,628.35

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-4-21-29>

ОБЗОР МЕТОДОВ УДАЛЕНИЯ СУЛЬФАТОВ ИЗ ТЕХНОГЕННЫХ ВОД ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Абдрахманова Р.Н.

ООО «ЕвроСинтез», г. Магнитогорск, Россия

Орехова Н.Н.

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

Фишер Х.-Б.

Bauhaus-Universität Weimar, Веймар, Германия

Абдрахманов Р.Н.

ООО «ЕвроСинтез», г. Магнитогорск, Россия

Нефедьев А.П.

ООО «ЕвроСинтез», г. Магнитогорск, Россия

Коссов Д.Ю.

ООО «ЕвроСинтез», г. Москва, Россия

Аннотация

Техногенные сточные воды богаты ионами и сульфатами тяжелых металлов, являются обычным явлением, связанным с окислением сульфидов добытых рудных тел и обработанных отходов. Окисленные

продукты попадают в водный организм, влияющий на качество воды за счет увеличения содержания металлов, концентрации растворенных солей и снижения потенциала водорода. Воздействие сульфата на окружающую среду ниже, чем растворенные металлы

или кислотность, и контроль над сульфатом получил мало внимания во многих регулирующих юрисдикциях. Следует отметить, что литература по удалению сульфатов из техногенных сточных вод сравнительно небольшая, хотя используется и разработано несколько технологий для снижения концентраций растворенных ионов, включая сульфаты. Уровни контроля сульфатов основаны на требованиях предельно допустимых концентраций (ПДК) приблизительно 100 мг/л для промышленных водоемов и рекомендаций по вторичной питьевой воде приблизительно 500 мг/л. Методы удаления сульфатов из техногенных сточных вод подразделяются на два типа: удаление через полупроницаемое мембранное разделение; удаление путем осаждения соли посредством ионного обмена; проницаемый реактивный барьер; биологическое восстановление или образование нерастворимого минерального осадка. В статье представлен об-

зор основных вариантов удаления сульфатов для техногенных сточных вод, экономическое и техническое сравнение доступных технологий. На основе продемонстрированного сравнения и экономических выгод наиболее перспективными на сегодняшний день являются биологический и реагентные технологии. Эффективным вариантом недорогой и предварительной обработки для сульфата является обработка извести при условии, что концентрация сульфата превышает 2000 мг/л. Наиболее подходящий вариант для удаления сульфата будет определяться специфическими для конкретного участка условиями для конкретной операции добычи.

Ключевые слова: методы очистки, кислые рудничные воды, сульфат-ионы, обратный осмос, реагентный способ, ионный обмен, биоочистка.

Поступила 18.06.18

Принята в печать 23.07.18

Образец для цитирования

Обзор методов удаления сульфатов из техногенных вод горных предприятий / Абдрахманова Р.Н., Орехова Н.Н., Фишер Х.-Б., Абдрахманов Р.Н., Нефедьев А.П., Коссов Д.Ю. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №4. С. 21–29. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-21-29>

For citation

Abdrakhmanova R.N., Orekhova N.N., Fischer H.-B., Abdrakhmanov R.N., Nefedjev A.P., Kossov D.Y. Methods of sulfate removal from mining waste waters: overview. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 4, pp. 21–29. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-21-29>

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

УДК 669.162.16

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-30-38>

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОТРЕБЛЕНИЯ УГОЛЬНОГО СЫРЬЯ В ПАО «ММК» НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Липатников А.В.¹, Шмелёва А.Е.¹, Степанов Е.Н.¹, Шнайдер Д.А.²¹ ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск, Россия² Южно-Уральский государственный университет (НИУ), г. Челябинск, Россия

Аннотация. Магнитогорский металлургический комбинат (ММК) – один из крупнейших мировых производителей стали и ведущая российская металлургическая компания. ПАО «ММК» представляет собой металлургический комплекс с полным производственным циклом, начиная с подготовки железорудного сырья и заканчивая глубокой переработкой черных металлов. Развитие ПАО «ММК» идет в направлении повышения конкурентоспособности продукции и снижения затрат на производство, что неразрывно связано с работой доменного цеха. Техничко-экономические показатели работы доменного цеха в значительной степени определяют экономику предприятия в целом, поэтому снижение себестоимости чугуна является важной и актуальной задачей. В общей структуре себестоимости чугуна расходы на кокс составляют около 30%. Таким образом, целью работы является решение задачи по снижению себестоимости чугуна за счет снижения расхода кокса в доменном цехе на основе оптимизации закупки угольной шихты. Задача оптимизации закупки угольной шихты заключается в подборе долевого участия поставщиков, обеспечивающего минимальную стоимость угольной шихты при технологически заданном качестве кокса. Результатом исследования являются: разработка методики оптимального потребления угольной шихты; определение нелинейных статистических взаимосвязей между показателями качества угольной шихты и показателями качества получаемого кокса, показателями качества кокса и удельным расходом кокса на уровне 70–80%; определение принципиальной возможности построения модели оптимизации привоза и потребления угольного сырья в ПАО «ММК» на основе имеющихся статистических данных; возможность снижения стоимости, используемой угольной шихты при аналогичном качестве, либо улучшения качества кокса при неизменной цене на основе использования разработанной модели. Дальнейшее развитие модели состоит в разработке автоматизированной системы планирования привоза и потребления угольной шихты, а также для прогнозирования качества кокса при фактическом привозе.

Ключевые слова: кокс, коксующийся уголь, закупка угля, системы поддержки принятия решений, промышленная оптимизация, автоматизация бизнес-процессов.

Введение

Острая конкурентная борьба на рынке металлопродукции вынуждает крупные комбинаты искать потенциальные возможности для снижения издержек практически во всех сферах своей деятельности. Потенциалы повышения эффективности производства за счет более интенсивного использования ресурсов оборудования и увеличения производительности труда практически исчерпаны, а иногда могут приводить к нежелательным последствиям, таким как отказы оборудования и производственные травмы.

Тем не менее существуют сферы, в которых все еще остается потенциал снижения затрат. Оптимизация технологических и бизнес-процессов, применение математического моде-

лирования для их описания открывают широкие возможности по снижению издержек без необходимости к излишнему стимулированию труда или эксплуатации оборудования на износ [1].

Исключение человеческого фактора из процесса принятия управленческих решений позволяет минимизировать риски, связанные с влиянием фактора человеческой иррациональности, однако следует учитывать важность и полезность накопленных людьми знаний и обязательно использовать их при разработке систем поддержки принятия решений.

Автоматизация и формализация человеческих знаний позволяет интегрировать опыт различных служб для решения комплексных задач, при этом получая такие решения, которые учитывают большую часть требований и пожеланий этих служб.

© Липатников А.В., Шмелёва А.Е., Степанов Е.Н., Шнайдер Д.А., 2018

Одной из наиболее сложных составляющих производства металлопродукции с точки зрения оптимизации управления технологическим процессом является доменное производство. Снижение затрат в этом переделе возможно в том числе за счет внедрения в производство оперативного и адаптивного управления [2].

Оперативное управление предполагает сбор данных с приборов учета, контроль и корректировку процесса в режиме онлайн. Адаптивное управление предполагает комплексную оптимизацию агло-коксо-доменного производства в целом, включая закупку угольного сырья для производства кокса [3].

В процессе принятия решений, связанных с закупкой угля, принимают участие различные службы ПАО «ММК»: научно-технический центр, коксохимическое производство, управление материально-технических и энергетических ресурсов и управление экономики. Формализация и оптимизация данного процесса позволит существенно снизить трудовые и временные затраты, а также учесть, в определенной степени, пожелания всех вышеперечисленных служб.

Отличительной чертой ПАО «ММК» является отсутствие постоянной, стабильной сырьевой базы. Данное обстоятельство открывает возможность для оптимизации процесса закупки и потребления угольных концентратов. Наличие большого количества поставщиков угля с различными качественными характеристиками позволяют получать угольную смесь определенного состава различными способами.

Таким образом, основная цель данного исследования заключается в поиске наиболее дешевого варианта структуры потребления угольной шихты, при которой будут выполнены все технологические требования, связанные с качеством поставляемых концентратов, рыночной конъюнктурой, состоянием оборудования коксохимического производства, заключенными договорами, состоянием склада угольных концентратов и т.д.

Модель прогнозирования качества кокса

Металлургический кокс – это крупнопористый материал высокой прочности, производимый при коксовании либо углей специальных марок, либо угольной шихты при температуре около 1400 К. Примерно 90% кокса, производимого из угольной шихты, используется для производства чугуна в доменных печах. При этом кокс выполняет три основные функции:

- в качестве топлива кокс обеспечивает тепло для протекания эндотермических химических реакций и для расплава шлака и металла;
- в качестве восстановителя кокс образует газы для восстановления железа из оксидов;
- в качестве пористой насадки кокс является единственным твердым материалом в горне доменной печи, который поддерживает чугун и создает коксовый тотерман, необходимый для протекания жидких фаз шлака и чугуна в горн и продвижения газа в шахту доменной печи [4].

Кокс – это наиболее важный материал, загружаемый в печь, с точки зрения влияния на ход доменного процесса и качество получаемого чугуна. Высокое качество кокса должно обеспечивать плавный сход шихты, при этом давая наименьшее количество примесей, наибольшее количество тепла, максимальное восстановление металла и оптимальную проницаемость для жидких и газовых потоков доменной печи. Использование кокса высокого качества позволит снизить удельный расход кокса, повысить производительность доменных печей и снизить себестоимость чугуна [5].

Так как решаемая задача является подзадачей для задачи более высокого уровня, а именно снижение себестоимости чугуна, то и часть ограничений, накладываемых технологами, является не непосредственным требованием на определенное качество угольной шихты, а требованием на определенное качество кокса. Следовательно, возникает дополнительная задача исследования зависимостей между показателями качества кокса и показателями качества угольной шихты. Данная задача была глубоко изучена специалистами ПАО «ММК» [6–8].

Общая постановка задачи представлена на рис. 1.

К основным показателям качества угольной шихты относятся: содержание влаги (W_r), содержание золы (A), выход летучих веществ (V_d), содержание серы (S), толщина пластического слоя (Y), показатель отражения витринита (Ro), сумма отошающих компонентов (S_{ok}) и коэффициент технологической ценности (TVC).

Для расчета показателей качества угольной шихты используется средневзвешенная сумма показателей с добавлением корректирующего коэффициента (1). Корректирующий коэффициент отражает среднюю разницу между фактическими лабораторными данными и средневзвешенной суммой показателей качества угольной шихты в соответствии со структурой ее потребления. Показатели качества для каждого поставщика определяются на основе лабораторных анализов.

$$K = \sum_{i=1}^n (k_i \cdot r_i) + k_{corr}, \quad (1)$$

r_i – доля i -го поставщика в общей поставке;

k_i – показатель качества i -го поставщика (Wr , A , Vd , S , Y , Ro , Sok , TVC);

k_{corr} – корректирующий коэффициент по одному из показателей;

K – средневзвешенное значение показателя качества угольной шихты;

n – число поставщиков.

К основным показателям качества кокса относятся: прочность по отношению к дробящим усилиям (M_{25}), прочность по отношению к истирающим усилиям (M_{10}), реакционная способность (CRI), горячая прочность (CSR), содержание золы (Ad), содержание серы (Sd).

Показатели качества кокса измеряются несколько раз в день, образуя месячные показатели качества.

Для исследования взаимосвязи между показателями качества кокса и показателями качества угольной шихты использовались методы регрессионно-корреляционного анализа. Изначально, в качестве исходной базы данных для исследования была использована статистика работы коксохимического производства за 2011–2015 года. Ввиду строго регламента работы на коксохимическом производстве, а также большого влияния технологических факторов, таких как погрешность методов отбора проб и проведения замеров показателей, состояние угольных башен и т.д., было решено дополнить базу данными индивидуальных ящичных спеканий, проводимых лабораторией коксохимического производства.

Уравнения зависимостей между показателями качества кокса и показателями качества угольной шихты выглядят следующим образом:

$$Y = \sum_i w_i x^k + w_0, \quad (2)$$

где Y – показатель качества кокса (M_{10} , M_{25} , Ad , Sd , CSR , CRI);

x – показатель качества угольной шихты (Wr , A , Vd , S , Y , Ro , Sok , TVC);

w_i – коэффициент уравнения регрессии, подбираемый с помощью метода наименьших квадратов;

w_0 – свободный член уравнения регрессии;

k – степень уравнения регрессии, определяемая эмпирически.

Полученные модели имеют нелинейный характер, обусловленный наличием экстремума по некоторым показателям качества угольной шихты. Степень объясненности уравнений составляет порядка 70–80% для показателей M_{10} , M_{25} , Ad , Sd и более низкую для показателей CSR , CRI , т.к. статистика по ним менее представительна. Данные показатели были исключены при дальнейшем исследовании. Оставшаяся часть, вероятно, обусловлена человеческим фактором, погодными условиями и состоянием оборудования.

На рис. 2 представлена динамика фактического и рассчитанного по модели показателя M_{10} на месячных данных за 2016 год. При этом следует учитывать, что прогноз рассчитывается на 1 шаг вперед, а после получения фактических данных уравнения уточняются.

Имея данные уравнения, можно рассчитать какого качества получится кокс при определенном составе угольной шихты, что открывает возможность к сравнению разных вариантов, в том числе которых ранее не было, и их последующей оптимизации. Тем не менее следует учитывать, что при кардинальном изменении состава угольной шихты необходимо корректировать полученные уравнения, добавляя данные по спеканиям в базу данных лабораторных спеканий, и пересчитывать регрессионные коэффициенты с учетом новой информации.

Модель привоза и потребления угольного сырья

Как было указано ранее, в процессе принятия решений по закупке угля участвует несколько подразделений. Каждое из этих подразделений имеет собственную цель: научно-техническому центру необходимо получить наилучшее качество кокса, коксохимическое производство стремится к максимизации производства при минимальном расходе угля на кокс, а также обеспечению страхового запаса шихты, коммерческие службы стремятся потратить наименьшее количество денег, а управление экономики заинтересовано в общем снижении затрат. На основе этих целей была разработана следующая модель:

$$F = \sum_{i=1}^n c_i r_i \rightarrow \min; \quad (3)$$



Рис. 1. Логика модели оптимизации потребления угольного сырья в ПАО «ММК»

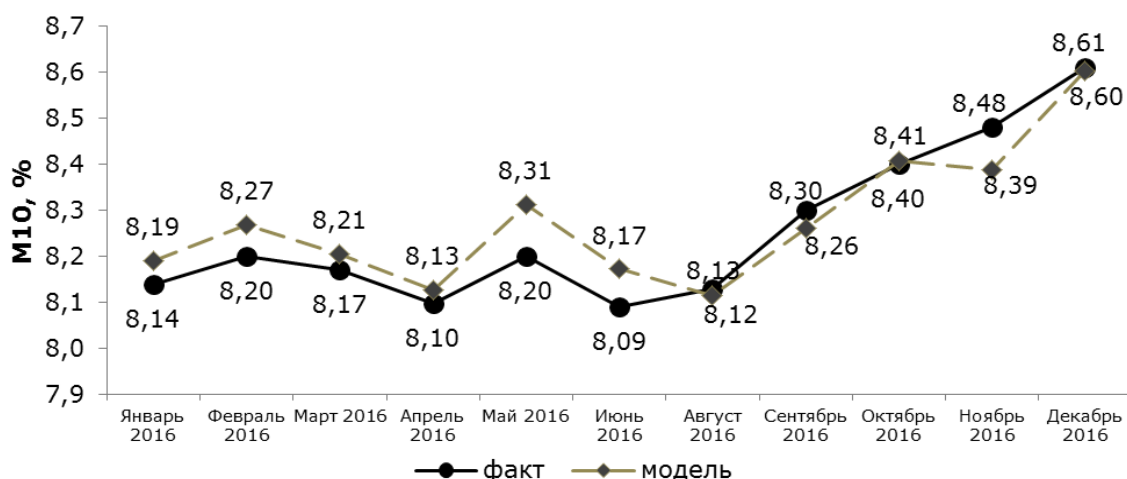


Рис. 2. Динамика фактического и рассчитанного на основе модели показателя истираемости кокса M_{10}

$$\begin{cases}
 M10 \leq M10^* & (4) \\
 M25 \geq M25^* & (5) \\
 Ad_c \leq Ad_c^* & (6) \\
 Sd_c \leq Sd_c^* & (7) \\
 Vd \leq Vd^* & (8) \\
 V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max} & (9) \\
 M10 \leq M10^* \sum_{i=1}^n f_i \leq f^* & (10) \\
 \sum_{i=1}^n r_i = 1 & (11) \\
 r_i \geq 0 & (12)
 \end{cases}$$

где c_i – цена одной тонны угольного концентрата i -го поставщика;

r_i – доля i -го поставщика в общей поставке;

n – число поставщиков;

M_{10} , M_{25} , Ad_c , Sd_c – основные показатели качества кокса (требуемое качество отмечено звездочкой);

V_i^{min} – минимальное контрактное ограничение для i -го поставщика;

V_i^{max} – максимальное контрактное ограничение для i -го поставщика, либо его производственная мощность;

V_i – объем поставки концентрата i -го поставщика;

f_i – доля жирной части в марочной структуре угля, % (требуемое качество отмечено звездочкой).

Целевая функция представляет собой стоимость 1 т угольной шихты (3). Коммерческие службы предоставляют цены для целевой функции на основе проводимых маркетинговых исследований. С этой точки зрения коммерческие службы являются основными пользователями модели, т.к. целевая функция отражает их желания.

Первая группа ограничений (4)–(7) исходит от технологов и представляет собой минимально допустимые показатели качества кокса (отмечены звездочкой - *).

В группу технологических ограничений также входят ограничения на марочный состав угольной шихты (10). Необходимо сохранять

определенные пропорции газово-жирной и коксующейся частей, чтобы технологический процесс протекал в штатном режиме и не приводил к авариям и поломкам оборудования. Научно-технический центр предоставляет данные лабораторных анализов входящего сырья по поставщикам, необходимые для расчета средневзвешенных показателей качества угольной шихты.

Вторая группа (9) представляет собой контрактные ограничения возникающих вследствие ограниченности возможностей поставок различных продавцов угольного сырья. В эту группу входят также долгосрочные договорные обязательства, предписывающие ПАО «ММК» приобретать определенное количество какого-либо концентрата ежемесячно. Данные ограничения предоставляет управление материально-технических и энергетических ресурсов.

Коксохимическое производство требует обеспечивать определенное содержание летучих веществ в шихте (8) для безопасности процесса и производства определенного количества продукции.

Требования управления экономики заключаются в экономической эффективности оптимизированного расчета по сравнению с вариантом, рассчитанным вручную.

Так как бюджет ПАО «ММК» в части закупки угольного сырья утверждается на месяц, то и план закупок и соответствующие ему планы поставок должны актуализироваться ежемесячно. Цены актуализируются управлением материально-технического и энергетических ресурсов тоже ежемесячно. Тем не менее задача оптимизации закупки угольного сырья может решаться в трех временных интервалах:

- на месячном интервале, для небольших корректировок бюджета;
- на квартальном интервале, в виде советчика управлению материально-технических и энергетических ресурсов для заключения новых контрактов с поставщиками;
- на годовом интервале для определения стратегических приоритетов ПАО «ММК» на рынке угольного сырья.

На **рис. 3** представлена упрощенная схема бизнес-процесса. Наиболее важной частью данного бизнес-процесса является анализ результатов. На этом этапе каждый отдел должен либо принять результаты расчета, либо предоставить замечания и изменить входные данные или условия расчета. Таким образом, процесс остается итеративным, однако не требует большого количества совещаний. Расчет гарантирует, что все пожелания будут выполнены. Однако иногда

возникает ситуация, при которой область ограничений представляют собой пустое множество, т.к. цели отделов противоположны.

Реализация модели и возникающие проблемы

Выполнение аналитических расчетов и оптимизация долевого участия поставщиков осуществлялась на основе языка программирования для статистической обработки данных и работы с графикой «R» [9, 10].

Входные данные поступают со всех отделов, вовлеченных в процесс. Так как уравнения (2) являются статистическими, необходимо уточнять их по мере поступления новых данных. Более того, в данной задаче область технологических ограничений является невыпуклой, так как уравнения зависимости качества кокса от качества угольной шихты (2) являются нелинейными. При оптимизации невозможно использовать классические методы линейного математического программирования. Следовательно, необходимо либо использовать градиентные методы локальной оптимизации, которые быстро дают результат, но не гарантируют приближения к глобальному решению, либо использовать эволюционные глобальные методы оптимизации, которые требуют значительных затрат времени на оптимизацию и в принципе тоже не гарантируют превосходного результата. Комбинация этих двух подходов может существенно улучшить результат, однако по-прежнему глобальный минимум может и не быть достигнут.

Было решено использовать усеченный алгоритм Ньютона (preconditioned truncated Newton algorithm) из открытой библиотеки для нелинейной оптимизации «NLOpt» [11], т.к. он давал наилучшие результаты при тестировании. Так как данный алгоритм предполагает безусловную оптимизацию, ограничения были переделаны в штрафы целевой функции расширенным алгоритмом Лагранжа.

Второй математической проблемой является несовместность ограничений, накладываемых одновременно различными службами. В данном случае область допустимых значений не имеет даже невыпуклой площади и решение задачи не существует как таковое. Данную проблему можно решить, преобразовывая ограничения в штрафные части целевой функции. Затем можно проводить уже безусловную оптимизацию, при этом часть ограничений может оказаться невыполненными. Правомерность отказа от части ограничений в определенной мере должно опре-

деляться службой, поставившей данное ограничение, при предъявлении результатов расчета. Например, если допустить, что качество кокса не достигает требуемого уровня, но стоимость существенно снижается, то возможно следует принять такой вариант, разумеется, если это не скажется на качестве дальнейших переделов, а лишь на удельных показателях расходных коэффициентов.

Основные выводы и результаты

Решение задачи определения структуры закупа угольной шихты в ПАО «ММК» в настоящее время осуществляется в ручном режиме. Структура подбирается во взаимодействии различных служб, причем каждая из них преследует свои цели, которые в большинстве случаев противоположны. Разработанная модель оптимизации потребления угольной шихты позволяет в

автоматизированном режиме подбирать оптимальный состав, учитывая пожелания всех служб и максимизируя экономический эффект.

Для оценки результатов решения используется 2 сравнительные таблицы. В первой отражено долевое участие поставщиков до оптимизации, т.е. рассчитанное вручную, и после оптимизации (табл. 1).

Как видно из таблицы, отличие не очень большое из-за строгих контрактных ограничений. Однако экономический эффект является значительным, т.к. закупается большое количество угля.

Таблицы 2, 3, 4 отражают ожидаемое изменение технологических и экономических показателей. Показатели разбиты на группы: показатели качества шихты, показатели качества кокса и общие технико-экономические показатели.

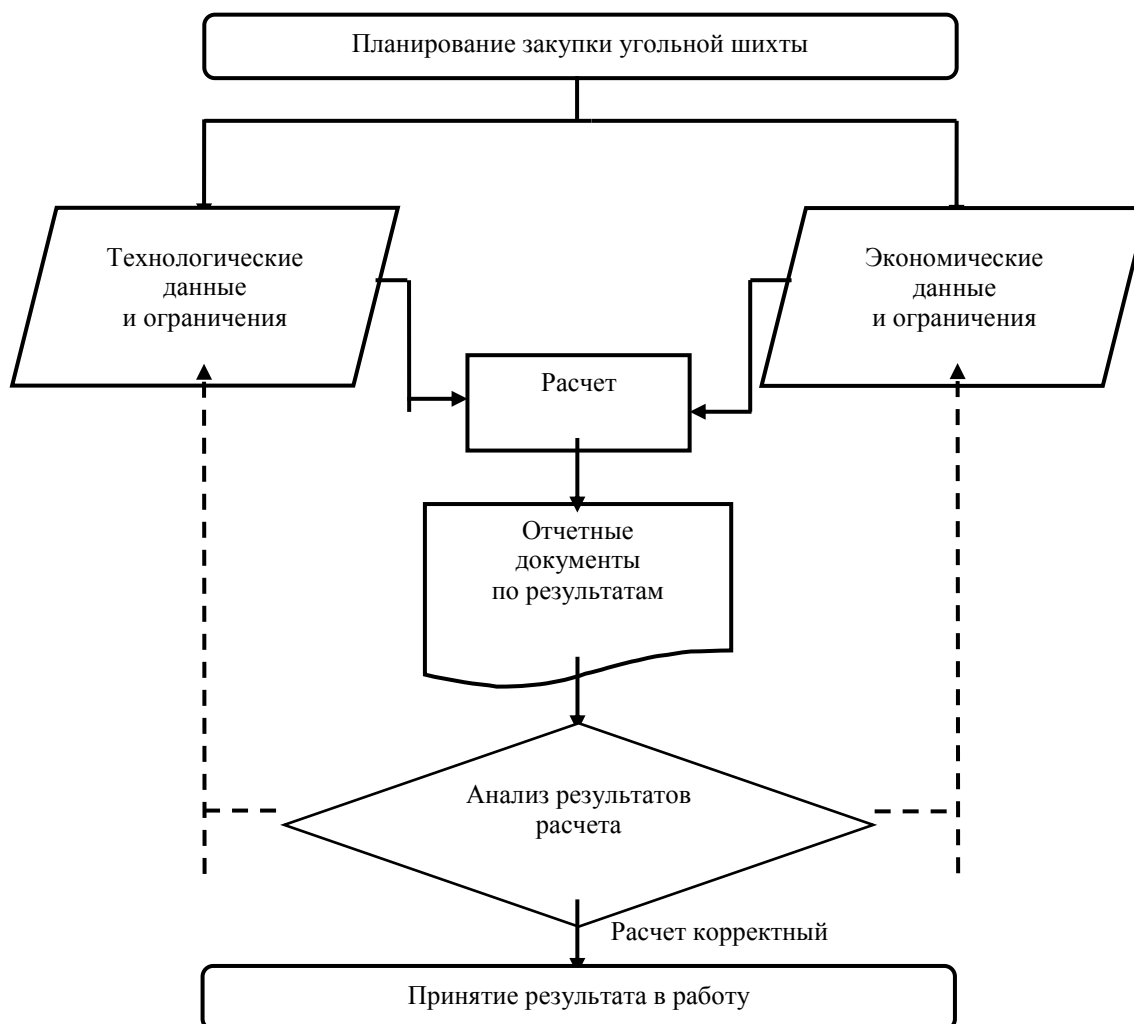


Рис. 3. Упрощенная схема бизнес-процесса планирования закупки угольной шихты с использованием модели оптимизации потребления угольного сырья в ПАО «ММК»

Таблица 1

Сравнение базового и оптимального вариантов

Поставщики	Марка угля	Базовый вариант, %	Оптимальный вариант, %	Разница, %
Поставщик А	Ж+КС	31,2	30,7	-0,5
Поставщик В	ГЖО+Ж	5,0	4,4	-0,6
Поставщик С	ГЖ	17,8	18,2	0,3
Поставщик D	ГЖО +ГЖ	-	1,5	1,5
Поставщик Е	ГЖ+Ж	-	1,5	1,5
Поставщик F	К+КО	4,3	2,0	-2,3
Поставщик G	КС	5,1	5,0	-0,2
Поставщик H	ОС	5,2	3,0	-2,2
Поставщик I	КО	4,2	-	-4,2
Поставщик J	ОС	0,1	-	-0,1
Поставщик K	КС+ОС	-	3,0	3,0
Поставщик L	К	2,8	0,8	-2,0
Итого		100%	100%	0

Таблица 2

Изменение качества кокса

Индикатор	Базовый вариант	Оптимальный вариант	Разница
M ₁₀ , %	8,19	8,19	0,00
M ₂₅ , %	88,64	88,65	0,02
Ad, %	12,91	12,86	-0,06
Sd, %	0,51	0,50	-0,01

Таблица 3

Изменение качества угля

Индикатор	Базовый вариант	Оптимальный вариант	Разница
W, %	8,42	8,36	-0,06
Ad, %	9,81	9,75	-0,06
Vdaf, %	28,75	28,72	-0,03
Sd, %	0,59	0,58	-0,01
Y, мм	19,24	19,07	-0,17
Ro	1,07	1,08	0,01
Sok, %	34,40	33,13	-1,28

В качестве требуемых показателей качества кокса использовались показатели качества базового варианта. Все показатели оказались лучше базовых. M₁₀ остался тем же, т.к. это наиболее критичный показатель.

В режиме опытно-промышленной эксплуатации экономический эффект от модели составляет около 50–70 млн руб. в месяц без снижения качества кокса.

К основным достоинствам модели можно отнести:

- интеграцию знаний различных служб в виде ограничений модели;
- допуски ослаблений на ограничения при несовместности области допустимых решений;
- снижение доли человеческого фактора в процессе принятия решений;
- применение модели не требует каких-либо изменений в технической или технологической составляющей процесса, а затрагивает лишь организационную его часть;
- комплексный подход к решению задачи закупа угольной шихты.

Таблица 4

Изменение общих технико-экономических параметров

Параметр	Базовый вариант	Оптимальный вариант	Разница
Удельный расход кокса, кг/т	441,0	440,3	-0,7
Производительность доменной печи в месяц, т	893 000	894 270	1 270
Цена, руб./т (на момент тестирования)	5771	5618,7	-152,25
Общие затраты, млн руб.	3803,4	3736,7	-66,7

Следующим этапом развития модели является ее опытно-промышленная эксплуатация в виде пилотного проекта. Для этого этапа необхо-

димо разработать базовый программный интерфейс, формы ввода и вывода информации для различных служб, настроить интеграцию с базами данных и корпоративными информационными системами ПАО «ММК». Следовательно, дальнейшее развитие модели состоит в разработке программной ее части. Завершающим этапом разработки модели станет описание бизнес-процесса, отражающего взаимодействие различных служб для успешного и своевременного функционирования модели.

Список литературы

1. Abdullin V.V., Shnayder D.A., Kazarinov L.S. Method of Building Thermal Performance Identification Based on Exponential Filtration // *Lecture Notes in Engineering and Computer Science: Proceedings of The World Congress on Engineering 2013, WCE 2013*, 3–5 July, 2013, London, U.K., pp. 2226–2230.
2. Казаринов Л.С., Барбасова Т.А., Захарова А.А. Метод прогнозирующего управления энергетической эффективностью промышленного предприятия // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника*. 2013. Т. 13. № 2. С. 12–24.
3. Shnayder D.A., Abdullin V.V. A WSN-based system for heat allocating in multiflat buildings, 2013 36th International Conference on Telecommunications and Signal Processing Proceedings, TSP 2013, 2–4 July, 2013, Rome, Italy, Article number 6613915, pp. 181–185.
4. Díez M.A., Alvarez R., Barriocanal C. Coal for metallurgical coke production: predictions of coke quality and future requirements for cokemaking // *International Journal of Coal Geology* 50 (2002) 389–412.
5. Valia H. S. Coke Production for Blast Furnace Ironmaking // *American Iron and Steel Institute*. 2014.
6. Исследование изменения физико-химических и прочностных свойств свойств скипового и фурменного кокса (ПАО «ММК») / Степанов Е.Н., Мельников И.И., Гридасов В.П., Степанова А.А. // *Сталь*. 2009. No 4. С. 2–4.
7. Прогноз качества кокса на основе экспертной оценки работы доменных печей / Степанов Е.Н., Моисеенко А.С., Тарасов Н.А., Нефедов С.Н., Верблюденко А.П. // *Металлург*. 2002. No 1. С. 40–42.
8. Степанова А.Е., Иванова Т.А., Степанов Е.Н. Оптимизация подбора угольной шихты и ее влияние на снижение расхода кокса в доменном цехе // *Совершенствование технологии в ПАО «ММК»: Сб. тр. Центральной лаб. ПАО «ММК»*. Вып. 11. Магнитогорск, 2007. С. 37–41.
9. Липатников А.В. Эконометрика в «R»: практикум. Магнитогорск: МГТУ, 2014. 76 с.
10. Crawley M.J., *The R Book*. Wiley, 2013, 1076 p.
11. Официальный сайт библиотеки «NLOpt»: ab-initio.mit.edu/wiki/index.php/NLOpt_Algorithms.

Поступила 14.11.18

Принята в печать 03.12.18

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-30-38>

MATHEMATICAL MODELING AND OPTIMIZATION OF RAW COAL CONSUMPTION IN PJSC «MMK»

Andrei V. Lipatnikov – Senior Specialist, Group of Mathematical Modeling and System and Analytical Research, R&D Center, PJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works, Magnitogorsk, Russia. E-mail: lipatnikov.av@mmk.ru

Anna E. Shmelyova – Senior Economist, Group of Mathematical Modeling and System and Analytical Research, R&D Center, PJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works, Magnitogorsk, Russia. E-mail: stepanova.ae@mmk.ru

Evgeny N. Stepanov – PhD (Eng.), Senior Specialist, Group of Sintering, Coking, and Blast Furnace Processes, R&D Center, PJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works, Magnitogorsk, Russia. E-mail: stepanov.en@mmk.ru

Dmitry A. Shnayder – DSc (Eng.), Professor, Automation and Control Department South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: shnayder.da@mmk.ru

Abstract. The Magnitogorsk Iron and Steel Works (MMK) is one of the world's largest steel producers and a leading Russian steelmaking company. MMK is a fully integrated production complex beginning with the iron ore preparation process through the ferrous metals downstream production. It focuses on increasing competitiveness of its products and reducing production costs, which are directly attributed to the blast furnace shop operation. The blast furnace shop performance indicators significantly determine business economics in general; therefore, cutting pig iron production costs is an important

current task. Coke expenses take about 30% of a total cast iron cost structure. Thus, the paper aims at undertaking a task of reducing cast iron cost by cutting coke consumption in the blast furnace shop as a result of the coal concentrate procurement optimization. The coal concentrate procurement may be optimized by selecting the suppliers' share that provides a minimum coal concentrate price and the coke quality required by the process. The results of the research are as follows: developing an optimum coal concentrate consumption method; determining nonlinear statistical relations between coal concentrate quality indi-

cators and resulting coke quality indicators, between coke quality indicators and specific coke consumption at 70–80%; determining a possibility to create a model for optimizing delivery and consumption of coal concentrate at PJSC MMK, using available statistical data; reducing the coal concentrate price, while keeping the same coke quality or improving the coke quality without changing the price, based on a developed model. Further development of the model lies in developing an automated system for planning delivery and consumption of coal concentrate, and for forecasting the coke quality considering actually delivered materials.

Keywords: Coke, coking coal, coal procurement, decision support systems, industrial optimization, business process automation.

References

1. Abdullin V.V., Shnayder D.A., Kazarinov L.S. Method of building thermal performance identification based on exponential filtration. *Lecture Notes in Engineering and Computer Science: Proceedings of the World Congress on Engineering 2013, WCE 2013*, July 3–5, 2013, London, U.K., pp. 2226–2230.
2. Kazarinov L.S., Barbasova T.A., Zakharova A.A. Method of energy efficiency predictive control of industrial facilities. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Kompyuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer Technologies, Control, Radio Electronics], 2013, vol. 13, no. 2, pp. 12–24. (In Russ.)
3. Shnayder D. A., Abdullin V. V. A WSN-based system for heat allocating in multi-flat buildings. *The 36th International Conference on Telecommunications and Signal Processing Proceedings, TSP 2013*, July 2–4, 2013, Rome, Italy, paper number 6613915, pp. 181–185.
4. M.A. Díez, R. Alvarez, C. Barriocanal. Coal for metallurgical coke production: predictions of coke quality and future requirements for cokemaking. *International Journal of Coal Geology*, 50 (2002), pp. 389–412.
5. Valia H. S. Coke production for blast furnace ironmaking. American Iron and Steel Institute, 2014.
6. Stepanov E.N., Melnikov I.I., Gridasov V.P., Stepanova A.A. Studies on changes in physical and chemical and strength properties of skip and tuyere coke (PJSC MMK). *Stal* [Steel], 2009, no. 4, pp. 2–4. (In Russ.)
7. Stepanov E.N., Moiseenko A.S., Tarasov N.A., Nefedov S.N., Verblyudenko A.P. Predicting coke quality, applying an expert evaluation of the blast furnace operation. *Metallurg* [Metallurgist], 2002, no. 1, pp. 40–42. (In Russ.)
8. Stepanova A.E., Ivanova T.A., Stepanov E.N. Optimizing a selection procedure for coal charge and its influence on a reduction of coke consumption at the blast furnace shop. *Sovershenstvovanie tekhnologii v PAO MMK: Sb. tr. Tsentralnoy lab. PAO MMK* [Improving process engineering at PJSC MMK: Collection of papers of the PJSC MMK Central Laboratory], issue 11, Magnitogorsk, 2007, pp. 37–41. (In Russ.)
9. Lipatnikov A.V. *Ekonometrika v "R": praktikum* [Econometrics with R: practical course]. Magnitogorsk: NMSTU, 2014, 76 p. (In Russ.)
10. M.J. Crawley. *The R Book*, Wiley, 2013, 1076 p.
11. Available at: ab-initio.mit.edu/wiki/index.php/NLOpt_Algorithms. An official web-site of the NLOpt library.

Received 14/11/18
Accepted 03/12/18

Образец для цитирования

Оптимизация потребления угольного сырья в ПАО «ММК» на основе математического моделирования / Липатников А.В., Шмельёва А.Е., Степанов Е.Н., Шнайдер Д.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №4. С. 30–38. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-30-38>

For citation

Lipatnikov A.V., Shmelyova A.E., Stepanov E.N., Shnayder D.A. Mathematical modeling and optimization of raw coal consumption in PJSC «MMK». *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 4, pp. 30–38. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-30-38>

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

UDC 621.777

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-4-39-44>

STUDY OF THE TECHNIQUE TO PRODUCE BIMETALLIC DEFORMED SEMI-FINISHED PRODUCTS FOR JEWELRY CHAINS MADE FROM RED GOLD ALLOYS

Sidelnikov S.B., Chibisova E.S., Lopatina E.S., Ditkovskaya Yu.D., Bindareva K.A., Lopatin V.A.

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Abstract. The authors of this paper propose and provide scientific substantiation for a new technique of producing bimetallic wire from precious metals for jewelry chains. The method is protected with a patent of the Russian Federation. The authors did calculations to define the processing regimes of cold rolling and drawing that would ensure a uniform distribution of the drawing force between the passes thus minimizing the required drawing force parameters. The PROVOL software was used for calculations that accounted for the actual production environment of the Gulidov Krasnoyarsk Non-Ferrous Metals Plant (aka JSC «Krastsvetmet»). The software has a certificate of state registration. Using the developed regimes, experimental studies were conducted to obtain a bimetallic wire with the core made of 925 silver alloy and the shell made of 585 gold alloy. A trial run of the technique, which was conducted by JSC «Krastsvetmet» to produce bimetallic wire for Singapore style chains, resulted in quality products. A study of the structure and properties of long-length deformed semi-finished products showed that the use of the new technique lead to enhanced strength and performance of the bimetallic wire for jewelry chains preventing defects during the chain bending process. Thus, the authors propose a new technique for producing bimetallic semi-finished products from precious metals alloys that helps improve the quality and expand the assortment of finished jewelry products.

Keywords: bimetallic semi-finished product, jewelry chains, gold, silver, core, shirt, modes of deformation, rolling of sections, drawing.

Introduction

Currently, the major share of the jewelry market falls on the production of jewelry chains and bracelets, the deformed semi-finished products for which are manufactured using metal processing operations [1–4], and only 10% are exclusive jewelry with precious and semiprecious stones [5]. Jewelry market is shrinking assortment of manufactured jewelry products, while Russia's share in world jewelry exports is only 0.12% (\$ 120 million). Most consumers prefer more affordable products, for example hollow chains, but at the same time in no way inferior in terms of external characteristics of full-weight products. At the same time, hollow chains are characterized by low strength and performance characteristics, and, as a rule, cannot be repaired. The main trends in the development of the jewelry market are an increase in competition for the import of jewelry a reduction in demand for the existing range of products. This entailed a reduction in the production of jewelry chains and bracelets as they become unclaimed which stimu-

lates jewelry companies to work on cheaper production and facilitating products [6, 7].

At the result with these trends in the development of the jewelry market the first main thing is the search for new methods and technologies for the production of jewelry chains from new alloys based on precious metals characterized by manufacturability in deformation processing and an increased level of strength and consumer properties. The authors suggest a method for preparing a bimetallic wire made from precious metals [8] which allows achieving the above advantages and at the same time is characterized by a relatively low production cost. In this case, a silver alloy of 925 samples was proposed as the core, and a new alloy of 585, which has a high level of mechanical properties due to a change in the percentage content of the alloy components and the use of modifying additives [8].

JSC «Krastsvetmet» produces about 160 jewelry braids which are based on various technologies for obtaining a deformed semi-finished product. [4]. The **fig.1** one of such typical technologies for the production of type «Korda» chains:

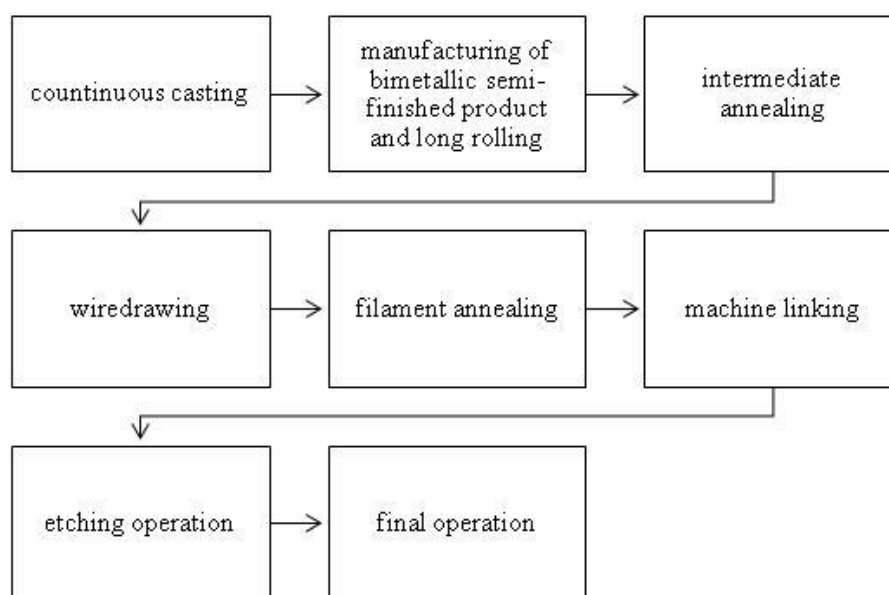


Fig.1. Typical technology for manufacturing jewelry chains

This technology is characterized by high process complexity and the use of etching to make a hollow chain. The basis of the bimetallic billet with the iron core and the shoe is made of a band of gold alloy of 585 tests. The main operations for the manufacture of lengthy deformed semi-finished products are the following: obtaining the cast billet from a gold alloy and rolling it to a strip of specified sizes; obtaining an iron core with a diameter of 8,0–8.3 mm; folding a gold strip around the iron core with a strip of gold; multi-transitional processes of cold profiled rolling and drawing of a bimetallic semi-finished product to produce a wire of the required diameter.

Analysis of the presented industrial technology for the production of hollow chains and features made it possible to propose the replacement of the iron core with silver from a 925 silver alloy. The shirt to be made from a new alloy based on 585 red gold with additives of modifiers in order to obtain a product with high strength and performance characteristics.

In the proposed technology, a deformable alloy based on precious metals has a high plasticity when processing a bimetallic semi-finished product with respect to an iron core that during deformation, can lead to cracks in the workpiece and wire breaks. In this connection problems of the correct choice of the deformation modes were taken into account, taking into account the limitations on energy-force parameters. The appointment of intermediate annealing between the processing cycles, in order to restore the ductility of the metal and to determine the mechanical properties of the deformed semi-finished prod-

ucts for studying their structure at each of the processing stages.

Computation of deformation modes of processing

Using the technical characteristics of the equipment used for standard technology and data on the geometric dimensions of the billet and wire, the deformation modes and energy-force parameters of cold-rolled and multiple-drawing processes were calculated. For their calculation, the PROVOL program [9], developed at the Department of Metal Pressure Processing of the Institute of Non-Ferrous Metals of the Siberian Federal University was used. This program was adapted to the industrial production conditions of OJSC Krastsvetmet, taking into account the existing scheme for the production of bimetallic semi-finished products for chains of the “Korda” type when rolling a billet 8 mm in diameter to a square rod with dimensions of 1.12x1.12 and drawing it further to a final wire diameter of 0.25 mm.

As a result, technological parameters for long rolling and drawing were obtained then used to carry out experimental studies in laboratory and industrial conditions. An example of calculating the drawing parameters is shown in Fig. 2.

Analysis of the base data showed that in contrast to the existing technology for the production of chains type of the “Korda” a uniform distribution of individual extracts and values of the stock coefficients is ensured, ensuring the production of semi-finished products without breakages during deformation (Table 1).

Ввод данных			Результаты расчетов									
Введите исходные данные				Коэффициент запаса	Усилие волочения, Н	Диаметр тяговой шайбы, мм	Скорость проволоки, м/с	Скорость шайбы, м/с	Скорость скольжения абс., м/с	Скорость скольжения отн., %	Вытяжка кинем.	Коэф. отн. опережения
Начальный диаметр	1,1	мм	1	1,69	125,62	80	0,07	0,33	0,25	77,06	1,12	1,29
Конечный диаметр	0,25	мм	2	1,51	114,45	89,99	0,11	0,37	0,26	70,23	1,13	1,27
Средняя вытяжка	1,355	мм	3	1,48	88,17	101,99	0,16	0,42	0,26	62,18	1,13	1,23
Оборудование	Сплав	Ок	4	1,56	62,85	116	0,22	0,48	0,25	53,44	1,12	1,21
Вытяжки по проходам			5	1,67	44,43	130	0,3	0,54	0,23	43,5	1,13	1,16
Введите значения вытяжек по проходам:			6	1,8	31,63	146,99	0,4	0,61	0,2	34,05	1,12	1,15
1: 1,48	6: 1,32		7	1,88	23,59	166	0,52	0,69	0,16	24,07	1,13	1,13
Знач. 1,46	вытяжек 1,30	походам приняты	8	1,97	17,74	188	0,67	0,78	0,11	14,19	1,12	1,1
3: 1,44	8: 1,28		9	2,12	13,24	211,99	0,84	0,88	0,04	4,88	1,13	1,05
4: 1,40	9: 1,25		10	2,53	9,39	239,99	1	1	0	0	1	1
5: 1,36	10: 1,22											
Очистить	Расчет	Графики	Отчет									

Fig. 2. The window to PROVOL program for calculating multiple drawing parameters

Table 1

Route of wire drawing

Travel number	Diameters, mm	Cross- section area, mm ²	Single rolling out	Total rolling out	Deformation degree, %	Draw stress, MPa	Reserve coefficient
1	0.90	0.64	1.48	1.48	32.4	379.3	1.83
2	0.75	0.44	1.46	2.16	31.5	551.4	1.54
3	0.60	0.31	1.44	3.11	30.6	622.6	1.49
4	0.53	0.22	1.40	4.36	28.6	623.1	1.56
5	0.45	0.16	1.36	5.92	26.5	598.2	1.67
6	0.39	0.12	1.32	7.82	24.2	561.1	1.81
7	0.34	0.09	1.30	10.17	23.1	543.0	1.88
8	0.30	0.07	1.28	13.01	21.9	522.1	1.97
9	0.27	0.06	1.25	16.27	20.0	486.4	2.13
10	0.25	0.05	1.22	19.84	18.0	449.2	2.31

The results of the research and analysis

Experimental research on pilot-industrial testing of the developed technology was carried out in the conditions of JSC «Krastsvetmet». The alloy for making the strip was obtained by direct fusing of the main components in a continuous casting furnace in a protective atmosphere. Modifying additives were introduced into the melt in accordance with known methods for modifying gold-based alloys. Rhodium pre-precipitated from the electrolyte by galvanic means to silver, was introduced into the melt in the form of an Ag-Rh ligature with a rhodium content

of 0.001 to 0.01 wt. % immediately before crystallization. Iridium was introduced as a melt of Cu-Ir components. The composition of the alloy was controlled by quantitative chemical analysis.

The bimetallic wire consisted of a silver core (alloy 925 – Sterling silver) and a shell of the proposed alloy based on 585 gold. The tape of a gold alloy 0.33–0.50 mm thick obtained by the cold rolling method was wrapped around a silver core - a bar with a diameter of 2.5–8.2 mm. This ensured the production of bimetallic billets and reduced the risk of shell detachment from the core of the wire during processing. Thus the ratio of the cross-sectional are-

as of the core and the body of the semi-finished product was 0.27–2.6. The bimetallic billet was subjected to cold long rolling and subsequent drawing to a final wire diameter of 0.25 mm. In the process of carrying out the pilot-industrial test during de-

formation, it was possible to ensure a tight fit of the gold shirt against the silver core (**Fig. 3**), to achieve a homogeneous fine-grained structure (**Fig. 4**) and to reach a high level of mechanical properties (**Table 2**).

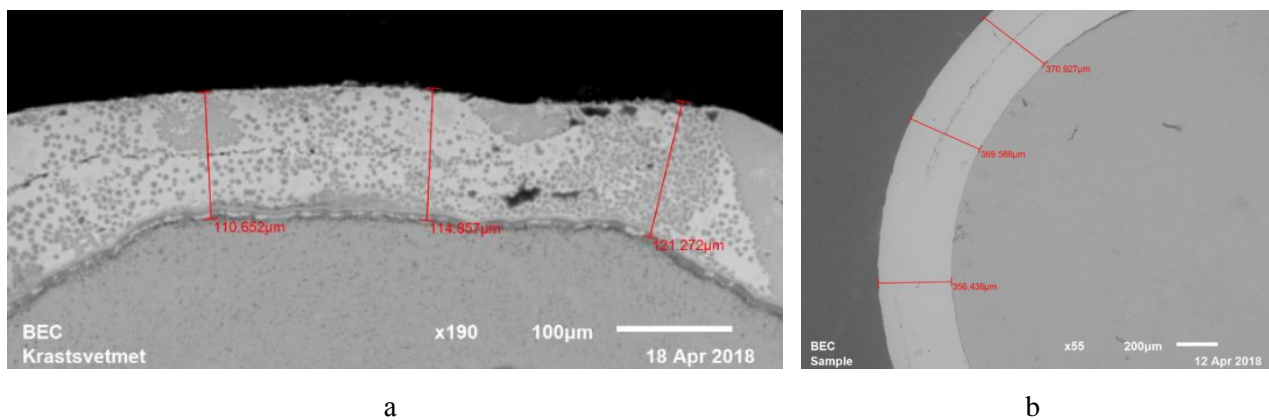


Fig. 3. Adjoining the golden shirt to the silver core after cold-rolled (a) and drawing (b)

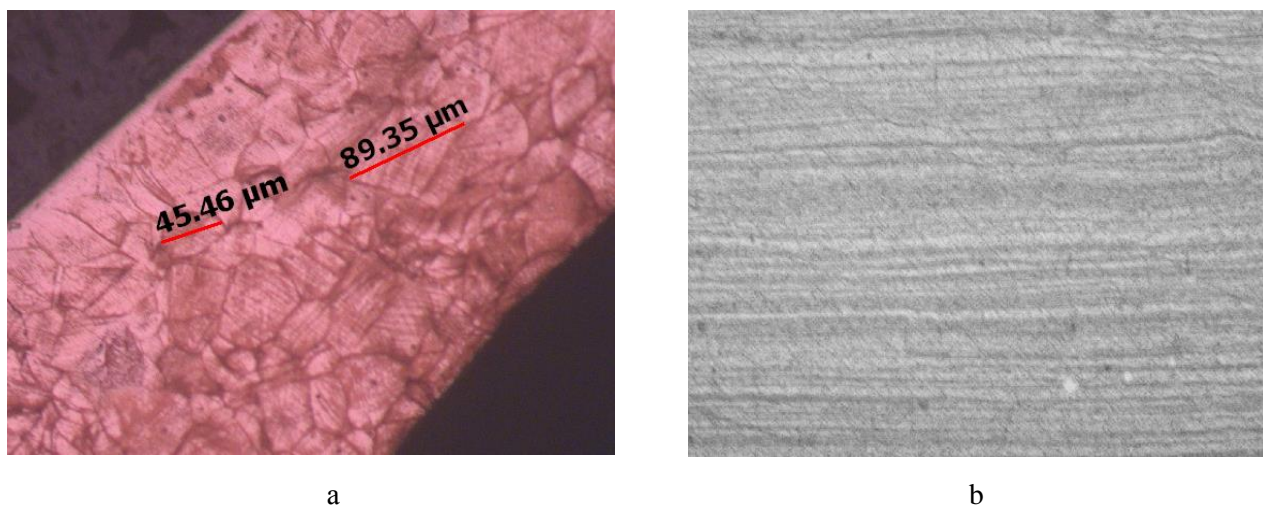
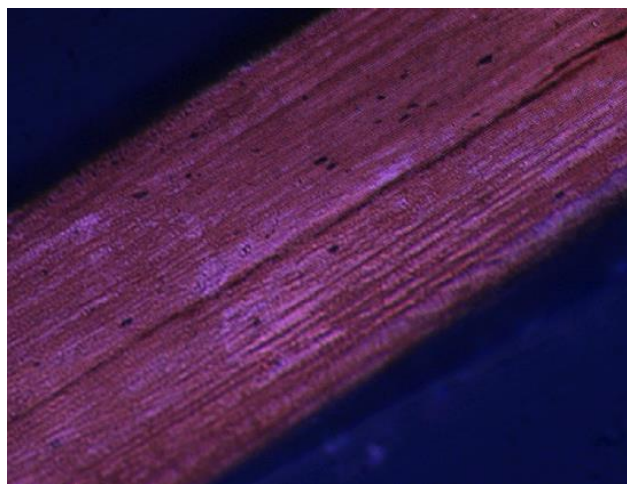


Fig.4. Microstructure of the bimetallic wire with a diameter of 0.6 mm: a – shell of a gold alloy of 585 samples; b – core made of 925 silver alloy, x500

Table 2

Mechanical properties of the metal bimetallic wire

Diameters, mm	Tensile strength, MPa	Flow limit, MPa	Percentage extension, %	Tensile strength, MPa	Flow limit, MPa	Percentage extension, %
	Cover from alloy of gold 585 of JSC «Krastsvetmet»			Cover of a gold alloy 585 samples with the addition of modifiers		
0,9	657	338	43.2	694	553	48.5
0,75	803	413	36.7	848	675	41.2
0,6	906	465	28.6	956	761	32.1
0,45	945	486	24.3	998	795	27.3
0,25	983	505	19.5	1038	827	21.9



a



b

Fig. 5. Type of wire (a) with increasing x200 and jewelry chain «Double diamond» (b)

A comparative analysis of the data on the mechanical properties of a metal shell made of a 585-alloy gold alloy used by JSC «Krastsvetmet» and a shell of a new alloy [8] shows that the strength and plastic properties of the latter are higher. This makes it possible to assume that the chaining process will take place without the formation of defects and the performance properties of jewelry chains manufactured by the new method will correspond to the existing requirements for this type of product.

From the obtained wire, experimental many high-quality jewelry chains were made (Fig. 5), with no breaks or detachments of the shirt from the core during chain linking.

Conclusion

At the result, the conducted studies showed that the proposed method of manufacturing bimetallic wire provides an increased level of mechanical properties and their uniform distribution along the length of the product. The process of manufacturing of bimetallic wire realized in industrial conditions on the basis of this method, makes it possible to obtain a tight fit of the shell to the core, is characterized by greater manufacturability of bimetallic semi-finished products increased strength and plastic properties of the metal. Decrease in the probability of breaks in the drawing process and stratification of the gold sheath during binding chain webs due to greater uniformity of mechanical properties along the length of the product. At the same time, the quality of jewelry, the mechanical and operational characteristics of the finished product is increased and its cost is reduced which gives grounds to recommend the proposed method for producing bimetallic wire in production.

References

1. Sidelnikov S.B., Dovzhenko N.N., Konstantinov I.L. et al. *Proizvodstvo yuvelimnykh izdeliy iz dragotsennykh metallov i ikh splavov* [Manufacture of jewelry from precious metals and their alloys]. Moscow: INFRA-M, 2016, 375 p. (In Russ.)
2. Brepol E. *Teoriya i praktika yuvelirnogo dela* [Theory and practice of jewelry business]. S. Petersburg: Solo, 2000, 528 p. (In Russ.)
3. Loginov Yu.N. *Protsessy obrabotki metallov davleniem v yuvelimnom dele: ucheb. posobie* [Metal forming processes in jewelry manufacturing: Textbook]. Yekaterinburg: USTU, 1998, 54 p. (In Russ.)
4. Zagirov N.N., Konstantinov I.L., Ivanov E.V. *Osnovy raschetov protsessov polucheniya dlinnomemykh metalloizdeliy metoda mi obrabotki metallov davleniem* [Production of long-length metal products by metal forming: Process design basics]. Moscow: INFRA-M, 2016, 311 p. (In Russ.)
5. *Zolotoe dno: kak rynok yuvelimnykh ukrasheniy menyaetsya v krizis* [The gold mine: How the jewelry market changes during crisis]. Available at: <https://secretmag.ru/trends/tendencies/gold.htm/>.
6. *Analiticheskiy obzor tekushchey situatsii razvitiya yuvelirnogo rynka Rossii* [Current status of the Russian jewelry market: Review]. Available at: <http://junwex.com/trends/analitika/analiticheskij-obzor-tekushhej-situaczi-razvitiya-yuvelirnogo-ryinka-rossii.html>.
7. *Krastsvetmet – lider po proizvodstvu zolotykh tsepey v Rossii* [Krastsvetmet as a leading gold chain producer in Russia]. Available at: <http://www.24rus.ru/news/economy/152053.html>
8. Sidelnikov S.B., Ditkovskaya Yu.D., Lopatina E.S., Pavlov E.A., Leontieva E.S., Lebedeva O.S., Bindareva K.A. *Sposob izgotovleniya bimetallicheskoj provoloki iz dragotsennykh metallov* [Method for manufacturing bimetallic wire from precious metals]. Patent RF, no. 2430982, 2017.
9. Sidelnikov S.B., Belyaev S.V., Lebedeva O.S., Ditkovskaya Yu.D., Leontiev E.S., Rudnitsky E.A., Solyanikova A.S. State Registration Certificate for the PROVOL computer software no. 2015612273 RF. Applied: 2014. Published: 2015.

УДК 621.777

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-4-39-44>

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ДЕФОРМИРОВАННЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЮВЕЛИРНЫХ ЦЕПЕЙ ИЗ СПЛАВОВ КРАСНОГО ЗОЛОТА

Сидельников С.Б., Чибисова Е.С., Лопатина Е.С., Дитковская Ю.Д., Биндарева К.А., Лопатин В.А.

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

Аннотация. Предложен и научно обоснован новый способ получения биметаллической проволоки из драгоценных металлов для ювелирных цепей, защищенный патентом РФ. Проведены расчеты деформационных режимов холодной сортовой прокатки и волочения, которые обеспечивают равномерное распределение вытяжек по проходам и дают возможность минимизировать энергосиловые параметры обработки. Для расчетов применительно к промышленным условиям производства ОАО «Красноярский завод цветных металлов имени В.Н. Гулидова» (ОАО «Красцветмет») применена программа «PROVOL», на которую получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. С использованием разработанных режимов проведены экспериментальные исследования по получению биметаллической проволоки, у которой в качестве сердечника использовался сплав серебра 925 пробы, а в качестве оболочки – сплав золота 585 пробы. Опытной промышленной апробацией технологии получения би-

металлической проволоки в ОАО «Красцветмет» для изготовления ювелирной цепи типа «Ромб двойной» позволила получить качественную продукцию. Исследования структуры и свойств длинномерных деформированных полуфабрикатов показали, что при использовании нового способа повышаются прочностные и эксплуатационные характеристики биметаллической проволоки для производства ювелирных цепей, и процесс цепевязания проходит без образования дефектов. Таким образом, предложен новый способ и технология получения биметаллических полуфабрикатов на основе сплавов из драгоценных металлов, которые позволяют повысить качество готовой продукции и расширить ассортимент ювелирных изделий.

Ключевые слова: биметаллический полуфабрикат, ювелирные цепи, золото, серебро, сердечник, рубашка, режимы деформации, сортовая прокатка, волочение.

Поступила 02.08.18

Принята в печать 17.09.18

Образец для цитирования

Исследование технологии получения биметаллических деформированных полуфабрикатов при производстве ювелирных цепей из сплавов красного золота / Сидельников С.Б., Чибисова Е.С., Лопатина Е.С., Дитковская Ю.Д., Биндарева К.А., Лопатин В.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №4. С. 39–44. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-39-44>

For citation

Sidelnikov S.B., Chibisova E.S., Lopatina E.S., Ditkovskaya Yu.D., Bindareva K.A., Lopatin V.A. Study of the technique to produce bimetallurgical deformed semi-finished products for jewelry chains made from red gold. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 4, pp. 39–44. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-39-44>

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

UDC 621.785.6/.7 : 669.15'26-194

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-4-45-49>

EFFECT OF INTERCRITICAL QUENCH HARDENING ON MECHANICAL PROPERTIES OF 11% CR STEEL

Mirzaev D.A.¹, Bezik A.S.¹, Sozykin S.A.¹, Makovetskii A.N.²¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russian² PJSC Chelyabinsk Pipe-Rolling Plant, Chelyabinsk, Russian

Abstract

The paper is devoted to the study of the possible use of corrosion- and heat-resistant steel grade 13Kh12N2W2MF (0.14% C; 10.8% Cr; 1.5% Ni; 1.9% W; 0.4% Mo; 0.3% V) for production of locking devices and parts of oil pumps. Technical specifications for the steels of this class require corrosion resistance, V-notch impact toughness at -60°C (KCV^{-60}) to be 24.6 J/cm^2 or higher, and yield and ultimate tensile strength greater than 650 and 800 MPa, respectively. The difficulty is that the parts have different weight and, consequently, different cooling rates after high-temperature tempering. Slow cooling of massive parts made of high-chromium steels may produce temper brittleness intensified by carbide precipitation, which dramatically decreases impact toughness. The first part of the study is about the effect of tempering temperature on room-temperature mechanical properties of the steel grade. Experimental data showed that 2-hour tempering at any temperature does not provide the required combination of strength and toughness, though the results of tempering at 750°C are the closest to it. Attempts to use double tempering at 750°C were successful only in several cases. This is probably due to the fact that, as dilatometric study showed, at 750°C austenite formation started and proceeded in an isothermal mechanism, i.e. the amount of austenite increased with increasing holding time. If one interrupts holding and cools the specimen down, then a part of austenite that formed during holding transforms to martensite. Thus, the first tempering is actually an intercritical quench hardening operation. So, in the second part of the study the intercritical quench hardening was consciously performed by varying the temperature of the first tempering from 750°C to 800°C and decreasing the temperature of the second one to 700°C (holding 2 hours, air cooling) in order to eliminate the strengthening effect of fresh martensite. Results showed that plasticity δ increases and strength properties decrease steadily with increasing temperature of intercritical quenching. The values of KCV^{-60} are very high and increase with increasing the temperature of heating in the intercritical range. This effect is mostly due to continuing high-temperature tempering of martensite that had not transformed to austenite, though precipitation and coalescence of carbide particles may play some role, too. However, in this series of experiments the required combination of mechanical properties was not achieved either. It became evident that the temperature of the second tempering of $680\text{--}700^{\circ}\text{C}$ is too high, but now because of a great decrease in yield and ultimate tensile strength of a part of prior martensite that transformed to austenite during the first tempering and then to fresh martensite during austenite cooling lower M_s . The strength of this part of martensite is higher than that of prior martensite tempered in the intercritical temperature range, at any temperature of the second tempering. Thus, the increase of the temperature of the first tempering increases final impact toughness, while the decrease of the temperature of the second tempering increases strength characteristics. The choice of temperatures of both temperings is a multivariant search that requires vast research. We tried only one additional mode, when tempering temperatures were taken as 765°C and 635°C . This provided the required level of mechanical properties with some extra impact toughness, which may be important for massive parts.

Keywords: 13Kh12N2W2MF steel; intercritical quench hardening; tempering; strength; impact toughness.

Introduction

The steel grade 13Kh11N2W2MF was developed as a high-alloy chromium heat-resistant martensitic class steel for exploitation at temperatures

up to 600°C [1]. However mechanical engineers started to use this steel for critical parts of oil pumps, valves and other locking devices of oil pipelines due to its good corrosion resistance, high strength and significant impact toughness at negative temperatures. Technical requirements for steels of this class include resistance to corrosion, V-notch impact toughness at -60°C (KCV^{-60}) greater than

24.6 J/cm² and yield and ultimate tensile strength ($\sigma_{0.2}$ and σ_b) not less than 650 and 800 MPa, respectively. A difficulty in providing these requirements is that the parts vary in size, and cooling rate after high-temperature tempering differs in a rather wide range. Slow cooling of massive parts made of high-chromium steels may cause temper embrittlement [2, 3] accompanied by carbide precipitation, which decreases the impact toughness sharply. The engineers of a «Konor» company (Chelyabinsk) have faced this phenomenon. Finishing heat treatment at that enterprise was quench hardening and 6-hour tempering at 750 °C with subsequent air or oil cooling. However, stable combination of required levels of impact toughness and strength failed to be achieved. Experiments with double tempering at the same temperature did not yield positive results either. So it became necessary to develop a special heat treatment schedule of 13Kh11N2W2MF steel. It is the main issue of this work. At the first stages of research a problem of lacking information on critical points of this steel appeared; our study of this problem was published in paper [4].

Materials and Methods

Standard specimens for tensile and impact tests were turned from billets cut from a forging previously normalized after 2-hour holding at 980 °C. Chemical composition of the steel is shown in **Table 1**.

First, the effect of tempering temperature on room temperature mechanical properties of the steel was studied in order to reveal the tendencies of change of principal characteristics. Tensile properties measured with INSTRON 5882 tensile testing machine at tension rate of 5 mm/min are shown in **Table 2**. Impact toughness tests were performed with IO 5003-0.3-12 impact pendulum-type testing machine and are shown in **Table 3**. The general character of strength, plasticity and toughness change is typical for alloy steels [5]. Of special interest is the temperature range about 475 °C where a small maximum of strength and minimum of impact toughness is observed. Classical “475-degree brittleness” cannot develop at 11 %Cr [6], so the reasons of embrittlement are probably precipitation of carbides and phosphorus segregation at prior austenite grain boundaries.

Analysis of Tables 2 and 3 permits to conclude that no one of the tempering regimes used permits to attain the required combination of mechanical properties, the results of tempering at 750 °C being the most close to it. Engineers of the Konar company attempted to raise impact toughness by means of double tempering at 750 °C, and in several cases this result was achieved. However, in most experiments the unallowable scatter of impact toughness among specimens subjected to the same heat treat-

ment was observed. This was probably due to the following circumstances.

Table 1

Chemical composition of the 13Kh11N2W2MF steel, wt. %

C	Si	Mn	Cr	Ni	W
0.144	0.60	0.23	10.8	1.50	1.86
Mo	V	Cu	S	P	
0.37	0.29	0.13	0.005	0.005	

Table 2

Tensile properties of the 13Kh11N2W2MF steel after tempering at different temperatures T_{temp} (measurements at room temperature)

$T_{\text{temp}}, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{0.2}, \text{MPa}$	σ_b, MPa	$\delta_5, \%$	$\psi, \%$
200	1360	1570	11.3	54.7
400	1358	1536	12.1	53.9
450	1394	1510	12.1	53.7
475	1436	1550	12.0	53.1
500	1186	1370	13.8	59.3
550	1056	1210	14.7	60.7
600	940	1039	15.5	61.2
700	724	837	18.3	65.8
750	630	793	22.3	66.1

Table 3

U-notch impact toughness (KCU) and Brinell hardness (HB) of the 13Kh11N2W2MF steel after tempering at different temperatures (measurements at room temperature)

$T_{\text{temp}}, ^\circ\text{C}$	KCU, J/cm ²	HB
200	60.1	442
400	59.0	439
450	52.1	436
475	37.6	447
500	72.5	390
550	86.2	346
600	102.1	318
700	133.0	249
750	160.0*	236

* $\text{KCV}^{-60} = 24.1 \text{ J/cm}^2$

Fig. 1 shows dilatograms of two specimens heated to 980 and 750 °C and cooled. The dilatogram of the specimen heated to 980 °C at 30 deg/min does not show any effects near 750 °C. For the second specimen, one sees first a bending, and then abrupt but small lowering of the curve. On subsequent cooling the curve proceeds lower, at almost constant distance from the heating curve. Near 410 °C a new bending occurs, after which the curve approaches the initial one. These phenomena have

an unambiguous explanation. At 750°C austenite formation starts; it occurs as isothermal, i.e. the amount of austenite formed increases with increasing holding time. It follows from the growing hardness of specimens held at 750°C for different time and water cooled (Fig. 2).

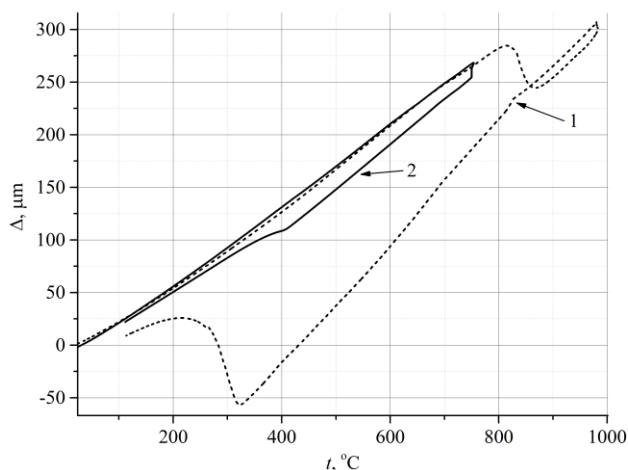


Fig. 1. Dilatograms of heating of specimens to 980 (1) and 750 °C (2), holding and cooling

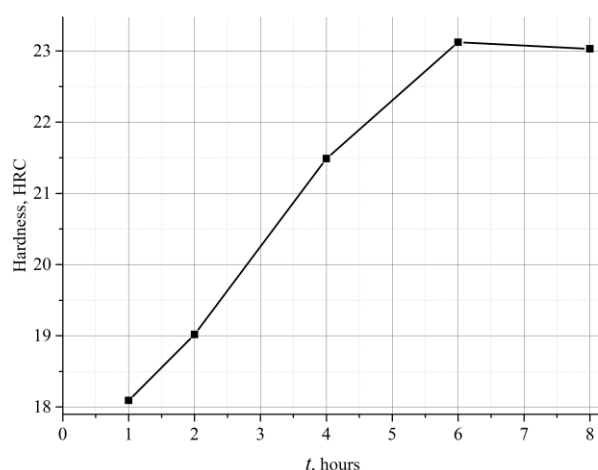


Fig. 2. Effect of holding time at 750 °C on steel hardness after cooling

If the holding is interrupted and the specimen cooled, then the portion of austenite already formed transforms to martensite near 410°C. Consequently, austenite formation and its transformation to martensite occurs both in the first and in the second tempering at 750°C. The martensite formed at the final stage of heat treatment is untempered and will of course increase hardness and decrease impact toughness of steel. Actually, any heating to 750°C is a mixed treatment, i.e. tempering + intercritical quenching (during cooling after the second tempering). To exclude martensite formation, the second tempering is to be performed at temperatures lower than 750°C.

Taking into account the results of investigation [5], we thus realized consciously the intercritical quenching, raising the temperature of the first tempering-quenching stepwise from 750 to 800°C. The temperature of the second tempering was chosen lower than 750°C but high enough (700°C, holding 2 hours, air cooling) to decrease the strengthening effect of martensite. Only in one of the regimes tried the second tempering temperature was lowered to 680 °C (see Table 4).

Table 4

Mechanical properties of the 13Kh11N2W2MF steel after double tempering

No.	Tempering temperature, °C*		$\sigma_{0.2}$, MPa	σ_b , MPa	δ , %	KCV ⁻⁶⁰ , J/cm ²
	1st	2nd				
0	750	700	626.1	759.3	24.8	51.7
1	765	700	548.6	732.0	26.4	67.4
2	765	680	526.0	729.5	27.3	65.1
3	780	700	509.0	717.5	27.8	67.7
4	800	700	483.0	710.5	27.8	69.2
5d	765	630	651.9	807.0	22.9	54.8

* Tempering time 2 hours in all cases

Experimental results show that plasticity (ultimate elongation δ) increases and strength properties decrease steadily with increasing temperature of the first tempering (intercritical quenching) in the range of 750–800°C. As for impact toughness KCV⁻⁶⁰, the use of intercritical quenching with subsequent tempering below A_{c1} makes it very high, and increasing with the increase of intercritical quenching temperature. To explain such behaviour one must take into account the fact that when the steel is heated to intercritical temperature range, prior martensite is separated into two parts. One part remains α phase, i.e. prior martensite subjected to very high temperature tempering, has lost its increased dislocation density, martensite substructure and a large amount of dissolved carbon, according to the phase diagram [5]. These processes, as well as coalescence of carbides, result in softening of this part of specimen volume, increasing plasticity and impact toughness, the greater the higher is the heating temperature in the intercritical range. Another part of prior martensite transforms first to austenite, and on further cooling to fresh martensite with high dislocation density and, supposedly, with higher carbon concentration. The strength of this part of martensite increases steadily with decreasing temperature of the second tempering due to retaining greater amount of defects and carbon atoms in its lattice. So, increasing temperature of the first tempering (quenching) increases resulting impact toughness of steel, while decreasing temperature and duration of the second tempering increases its strength.

Let us apply these considerations to the data on mechanical properties of heat treated steel in Table 4 (excluding the sample 5d). Increasing the temperature of the first tempering (intercritical quenching) in no case yielded the required combination of mechanical properties, in spite of very high impact toughness obtained in all regimes. Evidently, the temperature of the second tempering of 680–700°C was too high again, but now because of very great decrease of ultimate and proof strength of the part of prior martensite that is retained during holding in the intercritical temperature range. That is, the choice of temperatures of the first and the second tempering is a multivariant search that requires vast investigation. We limited ourselves to one additional regime 5d (Table 4), where the first tempering was done at 765, and the second at 635 °C (duration 2 hours in both cases). The obtained values of mechanical properties satisfy the requirements, and there is some extra impact toughness which may be important for massive components. In conclusion it should be noted that for clear understanding of the processes in all detail one needs to study thoroughly the character of precipitation and dissolution of carbides during the treatments.

Conclusion

1. Austenite formation on heating of 13Kh11N2W2MF steel starts isothermally somewhat below 750°C.

2. The levels of mechanical properties of the steel required by technical conditions for locking devices of pipelines cannot be provided by any combination of quench hardening and single tempering, even at a temperature as high as 750°C.

3. Optimal regime of finishing heat treatment is double tempering, the first stage being actually an intercritical quench hardening. It is shown that increasing the temperature of the first tempering increases significantly final impact toughness, while decreasing the temperature of the second one in-

creases steel strength.

4. Results demonstrate that there may be many variants of tempering regimes that would provide required combination of strength and toughness of steel. One of such regimes tried in this research is double two-hour tempering at 775 and then at 635°C.

The work was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (state assignment No. 3.9660.2017/BCh; publication number 3.9660.2017/8.9). Mechanical properties of the steel were studied at the facilities of the Public Research Institute Test Mechanical Engineering of the South Ural State University headed by the candidate of science R.A.Zakirov.

References

1. *Marochnik staley i splavov* [Reference book of steels and alloys]. Ed. V.G.Sorokin. Moscow, Mashinostroenie, 1988. 640 p. (In Russ.)
2. Maslenkov S.B. *Zharoprochnye stali i splavy* [Heat-resistant steels and alloys]. Moscow, Metallurgiya, 1983. 192 p. (In Russ.)
3. Khimushin F.F. *Nerzhavayushchie stali* [Stainless steels]. Moscow, Metallurgiya, 1967. 800 p. (In Russ.)
4. Mirzaev D.A., Mirzaev A.A., Sozykin S.A., Vorob'eva A.S. Dilatometric study of critical points of 13Kh11N2V2MF steel. *Bulletin of the South Ural State University. Series "Mathematics. Mechanics. Physics"*, 2017, vol. 9, no. 3, pp. 66–71. (In Russ.) DOI: 10.14529/mmph170309
5. Bernshteyn M.L., Kaputkina L.M., Prokoshkin S.D. *Otpusk stali* [Tempering of steel]. Moscow, MISIS, 1997. 335 p. (In Russ.)
6. Mirzaev A.A., Yalalov M.M., Mirzaev D.A. Calculation of the energy of mixing for the Fe–Cr alloys by the first-principles methods of computer simulation. *Physics of Metals and Metallography*, 2004, vol. 97, no. 4, pp. 336–341. (In Russ.)
7. Kositsyna I.I., Sagaradze V.V., Zuev Yu.N., Peruha A. Decrease in the ductile-brittle transition temperature of a high-chromium reactor steel MANET-II. *Physics of Metals and Metallography*, 1998, vol. 86, no. 2, pp. 205–210. (In Russ.)

Received 21/06/18

Accepted 10/08/18

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

УДК 621.785.6/7 : 669.15'26-194

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-4-45-49>

ВЛИЯНИЕ МЕЖКРИТИЧЕСКОЙ ЗАКАЛКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ 13X11N2W2MF

Мирзаев Д.А.¹, Безик А.С.¹, Созыкин С.А.¹, Маковецкий А.Н.²

¹ Южно-Уральский государственный университет (НИУ), г. Челябинск, Россия

² ПАО «Челябинский трубопрокатный завод», г. Челябинск, Россия

Аннотация. Статья посвящена изучению возможности использования коррозионностойкой и жаропрочной стали 13X12H2B2MF для изготовления запорной

арматуры и деталей нефтяных насосов. Технические условия для сталей этого класса сводятся к требованию стойкости по отношению к коррозии и уровню

ударной вязкости KCV при -60°C более $24,6 \text{ Дж/см}^2$, а также пределов текучести и прочности более 650 и 800 МПа соответственно. Сложность ситуации заключается в том, что изготавливаемые детали могут иметь разную массу, поэтому для них скорость охлаждения от температур высокого отпуска после закалки изменяется в довольно широких пределах. При замедленном охлаждении массивных деталей из высокохромистых сталей может возникнуть обратимая отпускная хрупкость, усиленная выделениями карбидной фазы, что резко понижает ударную вязкость. В первой части исследования была поставлена цель выяснить влияние температуры отпуска на механические свойства стали при комнатной температуре. Анализ полученных данных позволил заключить, что ни при одной температуре двухчасового отпуска не удастся достигнуть требуемого сочетания механических свойств, хотя результаты для отпуска при 750°C максимально близки к нему. Попытки использовать двукратный отпуск при 750°C оказывались успешными только в отдельных случаях, что произошло, вероятно, в силу следующих причин. Как показала дилатометрия, при 750°C начинается образование аустенита, которое идет по изотермическому варианту, то есть количество образующегося аустенита возрастает по мере повышения длительности выдержки. Если прекратить выдержку и провести охлаждение, то возникшая порция аустенита превращается в мартенсит. Следовательно, первый отпуск фактически является межкритической закалкой. Поэтому во второй части исследования была сознательно реализована межкритическая закалка образцов при температурах первого отпуска от 750 до 800°C , причем температура второго отпуска была снижена до 700°C (выдержка 2 ч, воздух), чтобы убрать упрочняющий эффект от свежего мартенсита. Результаты экспериментов показали, что с повышением температуры межкритической закалки величина δ (пластичность) непрерывно возрастает, а прочностные свойства снижаются. Значения KCV^{-60} оказываются очень высо-

кими, причём увеличиваются с повышением температуры в межкритическом интервале. Этот эффект в основном связан с продолжающимся высоким отпуском не превратившегося в аустенит мартенсита, хотя выделение и коагуляция карбидных частиц могут оказать некоторое влияние. Однако требуемого сочетания механических свойств и в этих опытах достигнуто не было. Стало очевидным, что температура второго отпуска $680\text{--}700^{\circ}\text{C}$ оказалась завышенной, но теперь по причине очень сильного снижения пределов прочности и текучести у той доли исходного мартенсита, которая в ходе первого отпуска превращается сначала в аустенит, а после охлаждения последнего ниже точки M_s – в свежий мартенсит. Его прочность при любой температуре отпуска выше, чем у исходного мартенсита, отпущенного при температурах межкритического интервала. Итак, повышение температуры первого отпуска повышает конечную ударную вязкость, тогда как снижение температуры второго отпуска увеличивает свойства прочности. Выбор температур первого и второго отпуска является многовариантным поиском, требующим обширных исследований. Мы ограничились одним дополнительным режимом, согласно которому температура первого отпуска была принята равной 765 , а второго 635°C . Достигнутые величины механических свойств удовлетворяют требованиям к изделиям, причём имеется запас по ударной вязкости, который важен для массивных деталей.

Ключевые слова: сталь 13X12H2B2MФ; межкритическая закалка; отпуск; прочность; ударная вязкость.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках государственного задания № 3.9660.2017/БЧ; публикация №3.9660.2017/8.9). Исследование механических свойств стали было проведено на базе НИИ «Опытное машиностроение» Южно-Уральского государственного университета, возглавляемого кандидатом наук Р.А. Закировым.

Поступила 21.06.18

Принята в печать 10.08.18

Образец для цитирования

Влияние межкритической закалки на механические свойства стали 13X11H2B2MФ / Мирзаев Д.А., Безик А.С., Созыкин С.А., Маковецкий А.Н. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №4. С. 45–49. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-45-49>

For citation

Mirzaev D.A., Bezik A.S., Sozykin S.A., Makovetskii A.N. Effect of intercritical quench hardening on mechanical properties of 11% CR steel. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 4, pp. 45–49. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-45-49>

CHANGES IN THE CHARACTERISTICS OF TOOL STEEL AFTER AEROTHERMOACOUSTIC TREATMENT

Atroshenko S.A.

Institute for Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russia

Abstract. This paper looks at ways to improve the characteristics of rapid steels. The authors try to understand how the microstructure changes during aerothermoacoustic treatment in comparison with conventional heat treatment techniques and what changes are typical of rapid steels under the aforementioned treatment. The main result of this work is an understanding of how different aerothermoacoustic treatment regimes influence the behavior of rapid steels. It was established that aerothermoacoustic treatment can be used to enhance the strength characteristics of rapid steels. A qualimetric analysis was carried out to estimate the effect of aerothermoacoustic processing on the characteristics of tool steels.

Keywords: aerothermoacoustic treatment, rapid steels, strength characteristics.

Introduction

Among the many hardening methods, it is promising to use the ability to control the characteristics of metals and alloys (hardness, wear resistance, ductility, cold resistance and corrosion resistance) by means of their structural and phase changes, which are realized in metals under the influence of powerful acoustic fields. Aerothermoacoustic treatment (ATAT) [1-3] is one of the combined means of influence on materials. When it is carried out, the effect of temperature and acoustic fields is realized in order to form the material properties in the desired direction both in the entire volume (the depth of the hardened layer is determined by the hardenability of the steel) and in the surface layer.

The present work is devoted to the experimental study of the microstructure of rapid steels after aerothermoacoustic treatment in combination with standard heat treatment (SHT) in various combinations and to elucidate the physical mechanisms that cause changes in mechanical and structural characteristics that determine the indices of durability and strength.

Materials and experimental technique

Materials for the study were: rapid steel grade R6M5 and American rapid steel grades HCV and HS. These materials were metallographically examined after aerothermoacoustic treatment and for comparison after standard heat treatment.

Studies of the microstructure were carried out on an optical microscope Neophot-32 on metallographic sections after chemical etching.

The microhardness was determined by the Vick-

ers method on the PMT-3 device at a load of 100 g. To study the change in the structure of rapid steel grade R6M5 from the surface to the center, the panoramas of the change in microhardness from the surface of the section to the middle were taken.

Results and discussion

The microstructure of the R6M5 steel drills in the initial state – after the standard heat treatment (SHT) consists of light carbides and dark grains of tempered martensite. The structure of the drill made from the same material after aerothermoacoustic treatment and after work as a cutting tool is not significantly different. The results of the quantitative characteristics of the structure in the initial and processed states are given in **Table 1**.

As can be seen, as a result of aerothermoacoustic processing, the grain size decreases and the carbides are crushed both small and large. In addition, carbides are distributed more evenly in the treated material. The increase in microhardness in the material after ATAT in comparison with the initial one (Table 1) is related to the homogenization of the structure. The table shows average values of microhardness measurements (HV_{average}), as well as minimum (HV_{min}) and maximum (HV_{max}) for the estimating the spread of microhardness values. Since the diameter of indentation was 12–13 μm , and the size of the carbide phase and grains of the α -solid solution is much smaller (from 2 to 7 μm), the microhardness is an integral one, characterizing the microhardness of both these phases and the uniformity of carbide distribution in the solid solution.

Table 1

Results of quantitative characteristics of the structure of steel R6M5

Material	Grain size, μm	Carbide size, μm		HV_{average} , MPa	HV_{min} , MPa	HV_{max} , MPa
		small	large			
R6M5 (SHT)	6,30	2,65	7,67	739	642	824
R6M5 (ATAT)	5,67	2,05	7,47	860	642	1097

To control the quality of drills of different lengths and diameters, the microhardness of the initial (after SHT) and the drills after ATAT was measured. The results of measuring eight drills are given in **Table 2**.

Table 2

Results of measuring the microhardness of drills

№	Drill size	Treatment	HV_{min} , MPa	HV_{average} , MPa	HV_{max} , MPa
1	$\varnothing 3\text{mm } l = 135\text{mm}$	SHT	572	824	1097
2		ATAT	824	1097	1288
3	$\varnothing 7\text{mm } l = 135\text{mm}$	SHT	624	824	1288
4		ATAT	824	946	1288
5	$\varnothing 3,5\text{mm } l = 70\text{mm}$	SHT	642	946	1097
6		ATAT	946	1097	1288
7	$\varnothing 5\text{mm } l = 135\text{mm}$	SHT	572	724	1097
8		ATAT	724	946	1288

According to the results it can be seen that the microhardness of the drills after aerothermoacoustic processing is much higher than the similar values after SHT.

After SHT, 28 holes were drilled, and after the ATAO - 192 holes. The structure of $\varnothing 3,6$ mm drills was examined after testing at the Sestroretsk Instrument Factory. Table 3 shows the characteristics of the structure in the surface layer and in the center of rapid steel drills.

It can be seen that in the treated drill in the surface layer the size of the large carbides is somewhat smaller than in the center, and the smaller is slightly larger, i.e. the averaging of carbides in the surface occurred, the grain size remained practically unchanged; In the initial state, the structure is almost identical on the surface and in the center.

Thus, in the surface layer of the material, after the treatment, the structure is aligned. Homogenization leads to a higher complex of mechanical properties of the material.

Table 3

Characteristics of the structure in the surface layer and in the center of high-speed steel drills

Material	Grain size, μm	Carbide size, μm		HV_{average} , MPa	HV_{min} , MPa	HV_{max} , MPa
		small	large			
R6M5 (SHT-surface)	6,40	2,73	7,60	680	642	724
R6M5 (ATAT-surface)	5,80	2,33	7,13	640	572	724
R6M5 (SHT-base metal)	6,53	2,60	7,60	743	572	946
R6M5 (ATAT-base metal)	5,60	1,87	7,27	799	642	946

Since the processing temperature does not exceed the temperature of the phase transformations, these structural changes can result from a change in the concentration of point defects, the formation of new dislocations and microdefects of packing by their interaction and redistribution, as well as the result of redistribution of the elements dissolved in the solid phase, which can be caused by thermal diffusion at multiple heating and cooling.

A factor that increases the characteristics of steels can be a thermo-hardening, because when heated and cooled, structural components, having different physical properties (heat capacity, thermal conductivity, coefficient of thermal expansion) and strength, experience internal microplastic deformation, which can also cause internal stress.

The structure of the R6M5 steel drills in the transverse and longitudinal sections is practically the same. The structure of American drills also represents tempered martensite and carbides. Drills of steel grade HCV in the longitudinal and cross sections have the same structure, and of steel HS - different.

In the HS steel, in the longitudinal section (**Fig. 1-1**), the carbide banding is visible.

These accumulations of carbides cause a lower microhardness (Table 4). In addition, this steel has a rather large amount of residual austenite, which can also explain the low microhardness for rapid steel.

The diagram of the change in microhardness from the surface to the center of the section after standard and aerothermoacoustic processing is shown in **Fig. 2**.

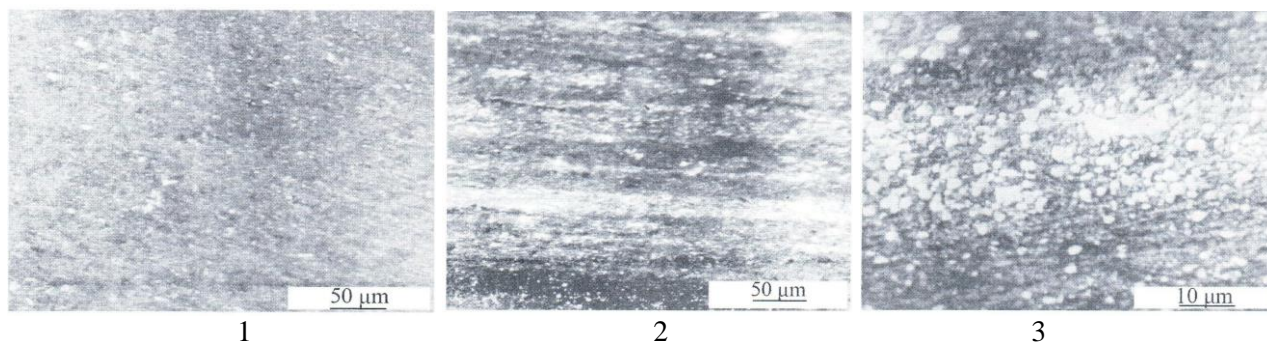


Fig. 1. Structure of US rapid steel HS after standard processing, along (1) and across (2, 3) textures

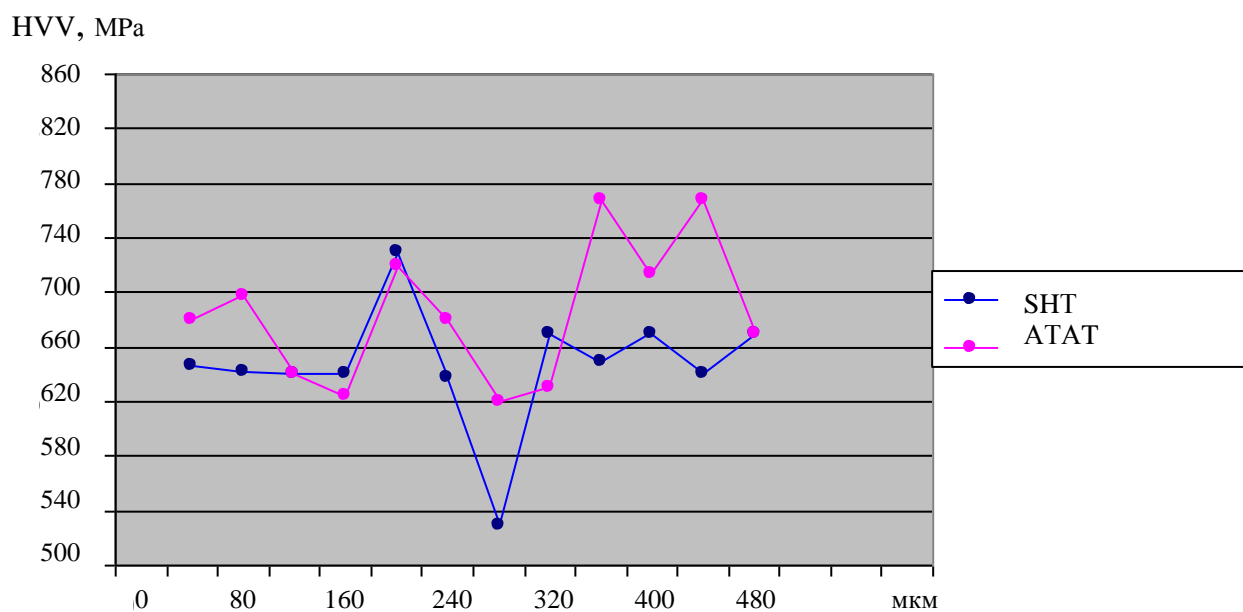


Fig. 2. Graph of the change in microhardness from the surface to the center of the section after SHT and ATAT

It can be seen that the microhardness in the surface layer of 100-150 μm from the edge of the drill in the material after the ATAT is lower than after the SHT. With further distance from the surface, the character of the change in microhardness in the initial and processed drills is the same. Closer to the middle - the microhardness of the drill after ATAT is higher than after the SHT.

Table 4

Comparison of the microhardness of rapid steel grades HCV and HS

Material	HV _{average} , MPa	HV _{min} , MPa	HV _{max} , MPa
Steel HCV	1019	824	1238
Steel HS	580	420	824

The initial drill (after SHT) was drilled 28 holes, and after aerothermoacoustic processing - 192 holes. Thus, the drills made of rapid steel after aerothermoacoustic processing are approximately 6.8 times stronger and more productive than similar drills after standard processing.

From the obtained data it can be concluded that the technology of aerothermoacoustic processing of tool steels shows a significant improvement in the strength properties of the drills being studied, and has undeniable advantages over standard processing methods.

Thus, the effect of processing on tool steel is manifested in a change in the quantitative characteristics of the structure - a more uniform distribution of carbides, grinding them and grain, i.e. in the homogenization of the structure. Practically in all cas-

es in tool steels after ATAT, an increase in microhardness from 10 to 33 percent is observed, with respect to SHT. Also, a homogenization of the structure is observed - grinding of carbides and austenite grain after this type of processing.

Qualimetric estimation of rapid steels processed by aerothermoacoustic method

1. Desirability function

The evaluation of the quality characteristics of billets treated with the aerothermoacoustic method, in comparison with the quality characteristics of billets obtained by standard methods of processing, is possible by means of the desirability function [4].

Desirability indicators are dimensionless nondiscrete quality characteristics that vary from zero to one in any range of dimensional quality indicators x_i .

The basis for constructing a generalized function is the idea of transformation the natural values of particular parameters into a dimensionless desirability scale. The desirability parameters q are calculated using the auxiliary parameters y (particular optimization parameters) according to the following formula:

$$q = \exp\left[-\frac{1}{y}\right] = \frac{1}{e^{1/y}} - \text{для } 0 < y < \infty \quad (1)$$

Dimension values x_i of natural quality indicators are recalculated into dimensionless auxiliary parameters y by the formula:

$$y = a_0 + a_1 x_i \quad (2)$$

As indicators of the quality of the blanks, the microhardness and the size of the carbides were selected. The initial information for constructing the nomogram of desirability is given in **Table 5**.

Table 5
Data for determining the dimensional desirability parameters, x_i

№	Type of treatment	Quality characteristics	
		microhardness HV	size of carbides, μm
1	SHT	739	7,67
2	ATAT	860	7,47
3	GOST	the best	836 (63 HRC)
		minimal	777 (62 HRC)

To transfer the values of microhardness to a dimensionless scale, the following system of equations was solved:

$$\begin{cases} 4,5 = a_0 + 836a_1 \\ 1,0 = a_0 + 777a_1 \end{cases} \quad \begin{cases} a_0 = -44,824 \\ a_1 = 0,059 \end{cases}$$

Thus, substituting the actual data (microhardness according to Vickers 762 HV and 860 HV in equations (1) and (2), it turns out:

$$y = a_0 + a_1 x_i = -44,824 + 0,059 \cdot 739 = 0,134;$$

$$q = \exp\left[-\frac{1}{y}\right] = \exp\left[-\frac{1}{0,134}\right] = 0,0006.$$

$$y = a_0 + a_1 x_i = -44,824 + 0,059 \cdot 860 = 5,916;$$

$$q = \exp\left[-\frac{1}{y}\right] = \exp\left[-\frac{1}{5,916}\right] = 0,844.$$

Similarly, the values of the desirability indices and the corresponding dimensionless auxiliary parameters for the size of the carbides are found.

The quality grades are selected in accordance with the data in **Table 6**.

Table 6

The values of the desirability indicators q and the corresponding dimensionless auxiliary indicators y

Gradation of quality	Index desirability q	Auxiliary index y
«Excellent»	$> 0,9$	> 10
«Splendid»	$\geq 0,80$	$\geq 4,50$
«Good»	$\geq 0,63$	$\geq 2,18$
«Satisfactorily»	$\geq 0,37$	$\geq 1,00$
«Bad»	$< 0,37$	$< 1,00$

The calculated data for the construction of nomograms of desirability are given in **Table 7**.

Table 7

Values of desirability indicators and corresponding dimensionless auxiliary indicators

№	Evaluation of changes in quality indicators			
	Microhardness HV		The size of carbides	
	y	q	y	q
1	0,134	0,0006	39,23	0,97
2	5,916	0,844	38,168	0,97

The nomogram of desirability for the considered quality indicators is shown in **Fig. 3**.

When analyzing the nomogram of desirability, the following conclusions can be drawn: – microhardness of a drill made of rapid steel R6M5 after aerothermoacoustic treatment corresponds to the level of desirability «excellent», and the size of carbides of this sample is «excellent»; – while the microhardness of drills obtained after standard processing corresponds to the level of desirability «bad», but the size of carbides corresponds to the level of «excellent»

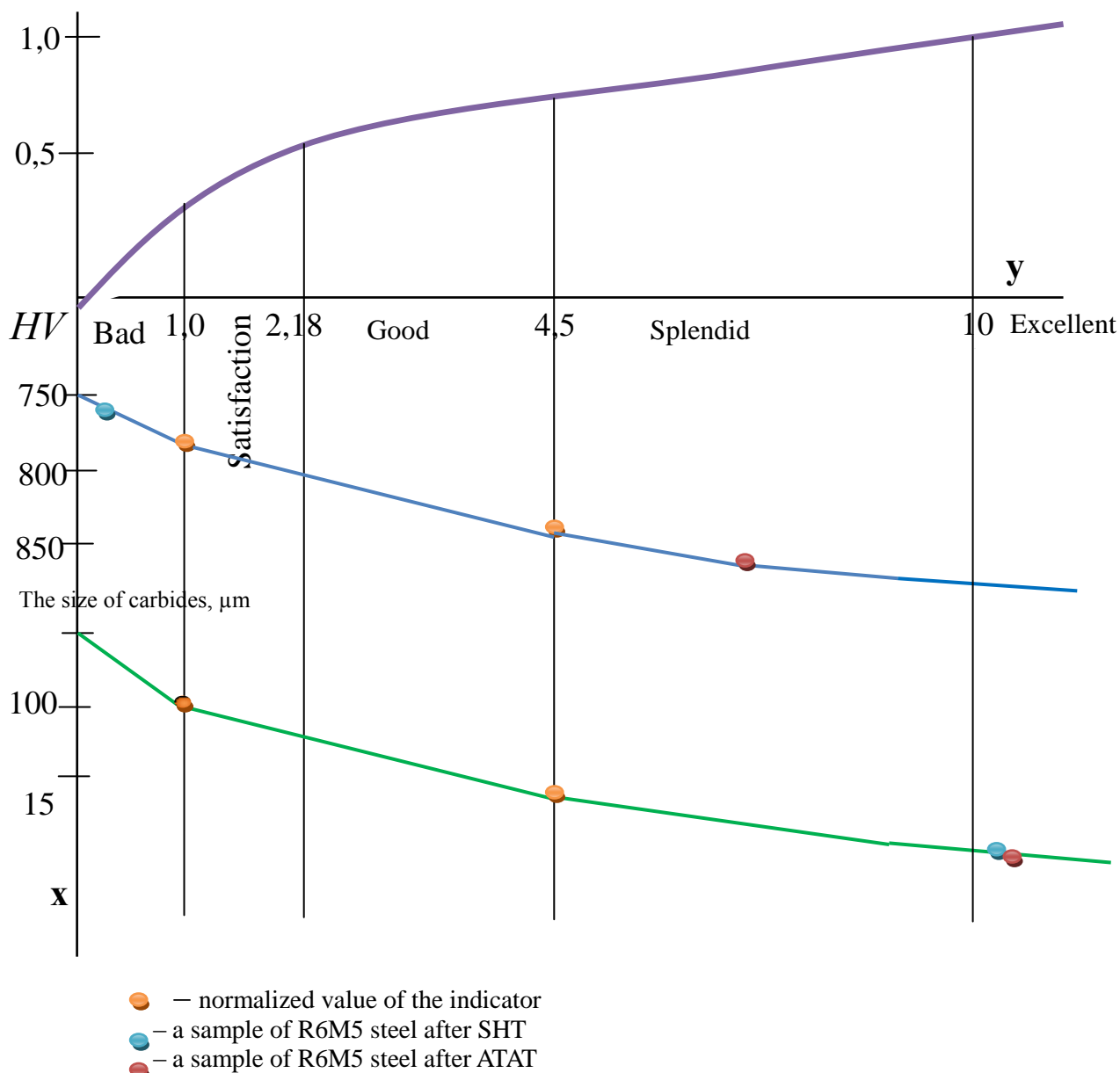


Fig. 3. Nomogram of the desirability index

2. Cobweb of quality

Of the characteristics revealed in the metallographic study and the study of strength properties, it is possible to form a comparison table for these values. A comparison of the microhardness of 8 samples after SHT and ATAT is given in Table 2. A comparison of the structure characteristics in the surface layer and the center of the drill made of steel R6M5 is given in Table 3. Based on them, it is possible to build a cobweb of quality and compare the obtained characteristics using the differential method.

Table 8

Relative parameters of microhardness

№	Drill size	Treatment	Relative parameters of microhardness
1	Ø3mm l=135 mm	SHT	1
2		ATAT	1,33
3	Ø7mm l=135 mm	SHT	1
4		ATAT	1,15
5	Ø3,5mm l=70 mm	SHT	1
6		ATAT	1,16
7	Ø5 mm l=135mm	SHT	1
8		ATAT	1,31

Table 9

Relative indicators of the quality of R6M5 steel in the surface layer

Material	Grinding of grain	Crushing of carbides	Micro-hardness	Carbide heterogeneity
SHT surface	1	1	1	1 (no)
ATAO Surface	1,1	1,1	0,94	1 (no)

Table 10

Relative indicators of the quality of R6M5 steel in the center of the drill

Material	Grinding of grain	Crushing of carbides	Micro-hardness	Carbide heterogeneity
SHT center	1	1	1	1 (no)
ATAT center	1,17	1,05	1,1	1 (no)

From the cobweb (Figure 4) it is clear that the area of the polygon occupied by the standard type of processing is much smaller than the area of the polygon occupied by the aerothermoacoustic type of processing, which indicates an improvement in the quality of drills of different diameters and lengths in the transition to ATAT. Similarly, it is possible to build quality cobwebs for microstructural characteristics in the surface and center of the drill. The obtained data showed that both in the surface layer and in the center of the drill, grinding of large and small carbides and austenite grains occurs in steels after ATAT.

From the constructed quality cobweb it is seen that the ATAT occupies a stronger position than the SHT in the center of the drill for such parameters of quality as grinding of carbides, grain refinement, increase in microhardness, which confirms the expediency of this treatment for hardening of tool steels.

From the constructed quality cobweb, one can conclude that the aerothermoacoustic treatment has a positive effect on the increase in the quality characteristics of tool steels. In almost all cases, in these steels after ATAT, an increase in the microhardness from 10 to 33 percent is observed, with respect to SHT. Also, a homogenization of the structure is observed - grinding of carbides and austenite grain after ATAT processing.

Conclusion

During this investigation peculiarity of tool steels microstructure formation during the realiza-

tion of different regimes of aerothermoacoustic treatment combined with conventional heat treatment regimes in different combinations and variations of mechanical properties and performance characteristics determining indicators durability and strength were studied.

1. The effect of aerothermoacoustic treatment on the structure of the materials under study was revealed. It was found that homogenization of the structure is observed during the processing. In a number of cases (tool steel R6M5), grinding of grain and reduction in the size of carbides are observed.

2. Rapid steel drill after aerothermoacoustic treatment is approximately 6.8 times stronger and more productive than similar drills after standard processing.

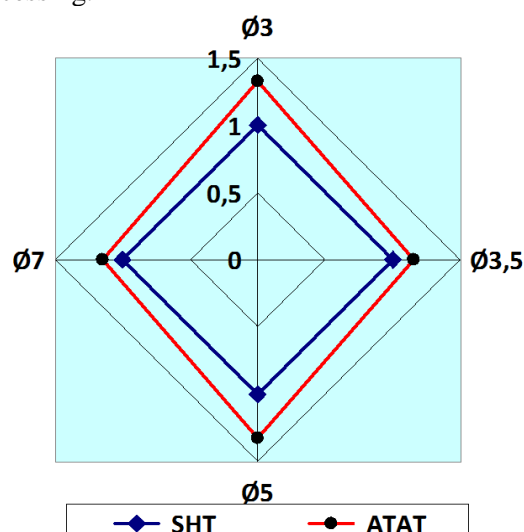


Fig. 4. Cobweb of comparison of microhardness of 8 drills after SRT and ATAO

3. In almost all cases, in these steels after ATAT, an increase in the microhardness from 10 to 33 percent is observed, with respect to SHT. Also, a homogenization of the structure is observed - grinding of carbides and austenite grain after this type of processing.

Thus, ATAT technologies provide a significant increase in the strength characteristics of tool steels in comparison with traditional methods of heat treatment. Application of aerothermoacoustic processing technology makes it possible to effectively realize the reserves of durability of the cutting tool. Consequently, it can be used in tool production to increase the strength characteristics of high-speed steels.

This study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (project no. 16-01-00638a).

References

1. Atroshenko S.A., Lamonova O.A. Study on the influence of aerothermoacoustic treatment on the quality of high-speed steels. *Vestnik INZheKONa* [Vestnik of Saint-Petersburg State University of Engineering and Economics. Series: Technical Sciences], 2009, no. 8 (35), pp. 95–107. (In Russ.)
2. Vorobyeva G.A., Skladnova E.E., Leonov A.F., Erofeev V.K. *Instrumentalnye materialy: uchebnoe posobie dlya studentov vuzov* [Tool materials: Training manual for university students]. S. Petersburg: Polytechnic, 2005, 267 p. (In Russ.)
3. Erofeev V.K., Vorobyova G.A., Genkin P.G. Aerothermoacoustic treatment of metals and alloys. *Metalloobrabotka* [Metal working], 2001, no. 6, pp. 18–22. (In Russ.)
4. E.C. Harrington. *Industrial Quality Control*, 21 (1965), 494 p.

Received 14/03/18

Accepted 10/09/18

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

УДК 621.78

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-4-50-56>

ВЛИЯНИЕ АЭРОТЕРМОАКУСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ БЫСТРОРЕЖУЩИХ СТАЛЕЙ

Атрошенко С.А.

Институт проблем машиноведения РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Работа посвящена повышению эксплуатационных характеристик быстрорежущих сталей. Объектом исследования является изменение микроструктуры в процессе аэротермоакустической обработки при сравнении со стандартными видами термической обработки и изменение при этом характеристик быстрорежущих сталей. Основной достигнутый результат работы – выявление зависимости влияния режимов аэротермоакустической обработки на поведение быстрорежущих сталей. Выяснено, что применение аэротермоакустической обработки может ис-

пользоваться для увеличения прочностных характеристик быстрорежущих сталей. Оценка влияния аэротермоакустической обработки на характеристики быстрорежущих сталей проведена квалитетным методом.

Ключевые слова: аэротермоакустическая обработка, быстрорежущая сталь; прочностные характеристики.

Исследование проведено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-01-00638а).

Поступила 14.03.18

Принята в печать 10.09.18

Образец для цитирования

Атрошенко С.А. Влияние аэротермоакустической обработки на характеристики быстрорежущих сталей // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №4. С. 50–56. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-50-56>

For citation

Atroshenko S.A. Changes in the characteristics of tool steel after aerothermoacoustic treatment. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 4, pp. 50–56. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-50-56>

ЭНЕРГЕТИКА МЕТАЛЛУРГИИ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ

УДК 621.31

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-57-64>

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОДУЛЯ ПЕЛЬТЬЕ В РЕЖИМЕ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СРЕДЕ ANSYS WORKBENCH

Романов К.В., Моторин А.В., Соломин Е.В., Ковалёв А.А., Дьяченко И.И., Галеев Р.Г.

Южно-Уральский государственный университет (НИУ), г. Челябинск, Россия

Аннотация. В мировом сообществе все большее внимание уделяется альтернативным источникам энергии. Модуль Пельтье – простейший преобразователь тепловой энергии в электрическую и наоборот. На данном этапе развития промышленности, техники, электроники и микропроцессорных технологий термоэлектрические элементы Пельтье в основном используют как тепловые насосы. Вследствие простоты, высоких показателей надежности, малых габаритов, относительно невысокой стоимости и других преимуществ термоэлектрические модули Пельтье рассмотрены как очевидные источники электрической энергии. Исследование произведено с целью определения возможности использования термоэлектрических модулей Пельтье в качественном преобразовании тепловой энергии в электрическую, а также для установления наиболее эффективных режимов работы элементов Пельтье в качестве генераторов электрической энергии. В ходе исследований выполнена работа, направленная на создание модели, анализ различных статических режимов генерации электроэнергии. Произведено моделирование режимов работы элементарной ячейки термоэлектрического модуля Пельтье в среде ANSYS Workbench. Произведён математический анализ результатов моделирования элементарной ячейки модуля Пельтье в различных режимах генерации электрической энергии. Определены рабочие характеристики термоэлектрических элементов Пельтье, выполнена обработка результатов. Выявлены условия максимума эффективности преобразования тепловой энергии в электрическую термоэлектрическим модулем Пельтье. Оптимальными режимами следует считать нагрев одной из сторон модуля Пельтье до температуры, близкой к допустимой. Определены рабочие режимы термоэлектрических элементов, выполнена обработка результатов. Устройство, основанное на применении термоэлектрических модулей Пельтье, возможно применить в качестве автономного средства зарядки аккумуляторов гаджетов и средств теле- и радиокommunikации.

Ключевые слова: модуль Пельтье, термоэлектрический преобразователь, альтернативная энергетика, теплоэнергетика, утилизация тепловой энергии, электроэнергетика.

Введение

Развитие современной техники и технологий постоянно связано с поиском новых источников энергии, а первую очередь – электрической. Основным требованием является увеличение объема ее выработки, но в последнее время на передний план выходят дополнительные условия: энергия должна вырабатываться экологически чистым путем, должна быть возобновляемая. Сегодня усилия многих ученых направлены на развитие «зеленой» энергетика, в которой особенно остро нуждаются Европа и США [1].

Термоэлектрический эффект – генерирование термоэлектродвижущей силы, возникающей из-за

разности температур между двумя соединениями различных металлов или сплавов, образующих часть одной и той же цепи [2]. Данный вид устройств генерации электрической энергии отличается от традиционных генерационных электроэнергетических систем тем, что тепловая энергия непосредственно преобразуется в электрическую энергию, а промежуточное звено в виде механической энергии отсутствует [3].

На данном этапе развития промышленности и прочих подобных сфер невозможно не отметить, что большое количество отработавшей тепловой энергии выбрасывается в окружающую среду без ее дальнейшего использования [4].

Элемент Пельтье – простейший преобразователь тепловой энергии в электрическую посредством термоэлектрического эффекта и, соответ-

ственно, потенциально наиболее эффективный инструмент для создания установок утилизации тепловой энергии. Модули Пельтье позволяют осуществить прямое преобразование энергии теплового потока в электрическую энергию (твердотельные генераторы электрической энергии) и наоборот (термоэлектрические холодильники) [5], а их работа в режиме генерации электрической энергии зависит только от наличия перепада температур [6]. Термоэлектрические генераторы (ТЭГ) являются экологически чистым источником электрической энергии, позволяют получить с одного генераторного модуля электрическую энергию мощностью до 40 Вт. Применение термоэлектрических модулей обладает целым рядом преимуществ, таких как отсутствие движущихся и изнашивающихся частей, экологическая чистота, звуковая и электромагнитная бесшумность работы, малый размер и вес, высокая надежность – до 200 000 часов наработки, устойчивость к механическим воздействиям, возможность работы в любом пространственном положении. Кроме того, твердотельная герметичная конструкция теплового насоса на основе термоэлектрических модулей (ТЭМ) позволяет отводить тепло из герметично закрытых объемов [7].

Однако в настоящее время модули Пельтье достаточно широко используются в основном для обратного эффекта – выделения тепловой энергии (охлаждения или нагрева) [8]. На рынке бытового оборудования представлены автохолодильники, рассчитанные на напряжение аккумулятора машины с разницей температур с окружающей средой до 30–40°C. Также модули Пельтье применяют в компьютерной технике для охлаждения электронных компонентов вычислительной техники [9].

Целью данной работы является создание модели и исследование статических режимов работы термоэлектрического модуля Пельтье в программном комплексе ANSYS Workbench. Данное программное обеспечение позволяет производить расчеты различных физических процессов методом разложения составляющих системы на конечные элементы.

Основная задача выполняемого расчета заключается в моделировании процессов генерации электрической энергии. Решение данной задачи позволит установить наиболее эффективные режимы генерации, а также вывести основные требования для повышения КПД преобразования. Исходя из особенностей конструкции модуля Пельтье (рис. 1), рационально произвести моделирование режимов работы элементарной ячейки термоэлектрического генератора.

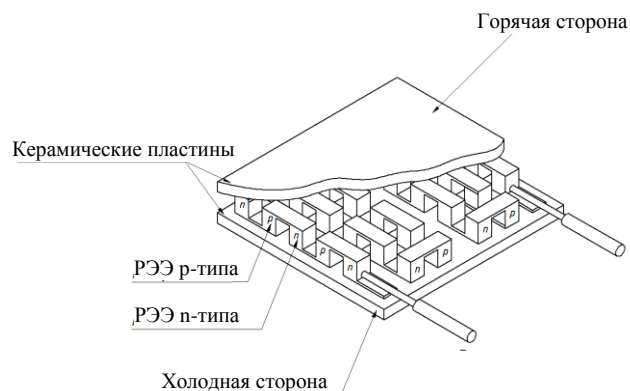


Рис. 1. Модуль Пельтье

Экономическая эффективность данного исследования заключается в повышении коэффициента полезного действия возможного устройства, созданного на базе термоэлектрических элементов Пельтье, по сравнению с мировыми аналогами за счет использования наиболее энергоэффективной технологии, а также в обеспечении энергонезависимости от электрической сети, возможности утилизации излишнего тепла при относительно невысокой стоимости и высокой надежности предлагаемого устройства по сравнению с подобными устройствами в альтернативной энергетике.

Метод построения модели элементарной термоэлектрической ячейки в программном комплексе ANSYS Workbench

Для оценки выходных характеристик энергетического преобразования целесообразно произвести моделирование в программном комплексе ANSYS Workbench. Для этого необходимо произвести следующие обязательные этапы моделирования: постановка задачи (preprocessing), расчет (processing) и анализ результатов расчета (postprocessing). Поскольку модуль Пельтье состоит из нескольких соединенных последовательно элементарных p-n полупроводниковых переходов, то для выполнения расчета достаточно будет смоделировать одну p-n ячейку. Выполнение модели позволит получить энергетические характеристики модуля Пельтье в различных статических режимах работы.

Первый этап подразумевает задание таких основных данных, как выбор и создание материалов для проекта и задание их свойств (Engineering Data). Материалы, необходимые для создания термоэлектрической ячейки, – это два разнородных вещества: полупроводник и p- и n-типа, электрически соединенные медной пластиной. Электротеплофизические свойства заданы в виде зависимостей. На рис. 2 изображены зависимости коэффици-

циента теплопроводности материалов от температуры для меди (а), полупроводника p -типа (б) и полупроводника n -типа (в).

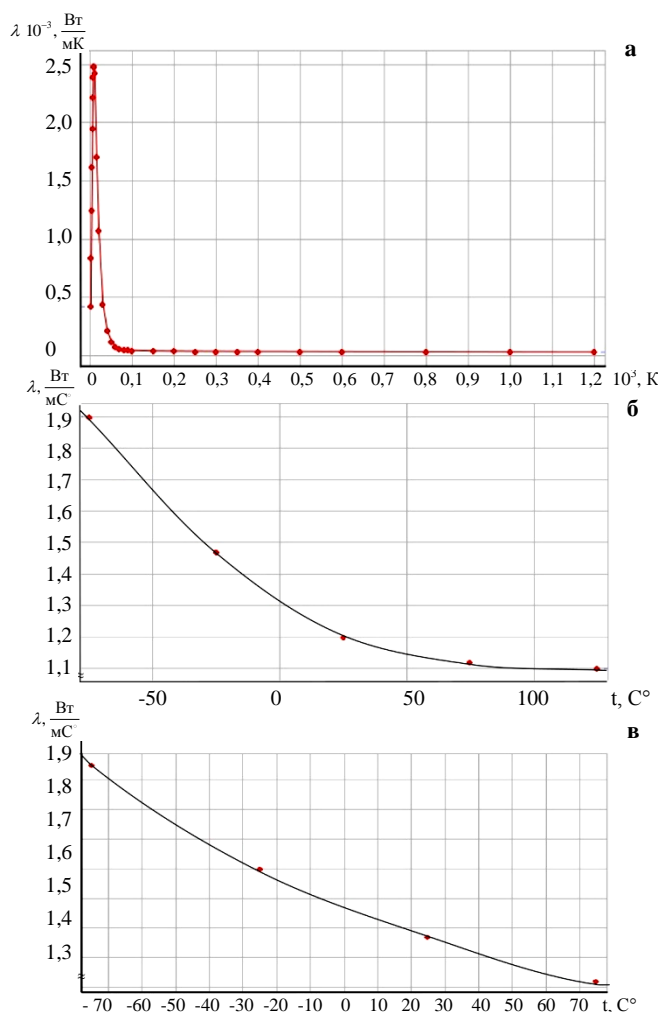


Рис. 2. Зависимости коэффициента теплопроводности материалов от температуры для меди (а), полупроводника p -типа (б) и полупроводника n -типа (в)

На рис. 3 изображены зависимости удельного сопротивления материалов от температуры для меди (а), полупроводника p -типа (б) и полупроводника n -типа (в).

На рис. 4 изображены зависимости коэффициента Зеебека от температуры для полупроводников p -типа (а) и n -типа (б).

Необходимо отметить, что физические свойства материалов берутся из табличных, но с некоторыми поправками, поскольку модель для каждого из модулей Пельтье индивидуальна в силу того, что невозможно создать два и более абсолютно идентичных по характеристикам модуля.

Далее следует разработка геометрической модели (Geometry). Геометрическая модель p - n перехода была создана посредством встроенных инструментов для геометрии AnsysDesignModeler и представлена на рис. 5. Также выполнено присвоение физических свойств материалов элементам 3D модели и задание графических условий (Model). Кроме того, был задан метод разбиения модели на сетку конечных элементов (Path Conforming Method).

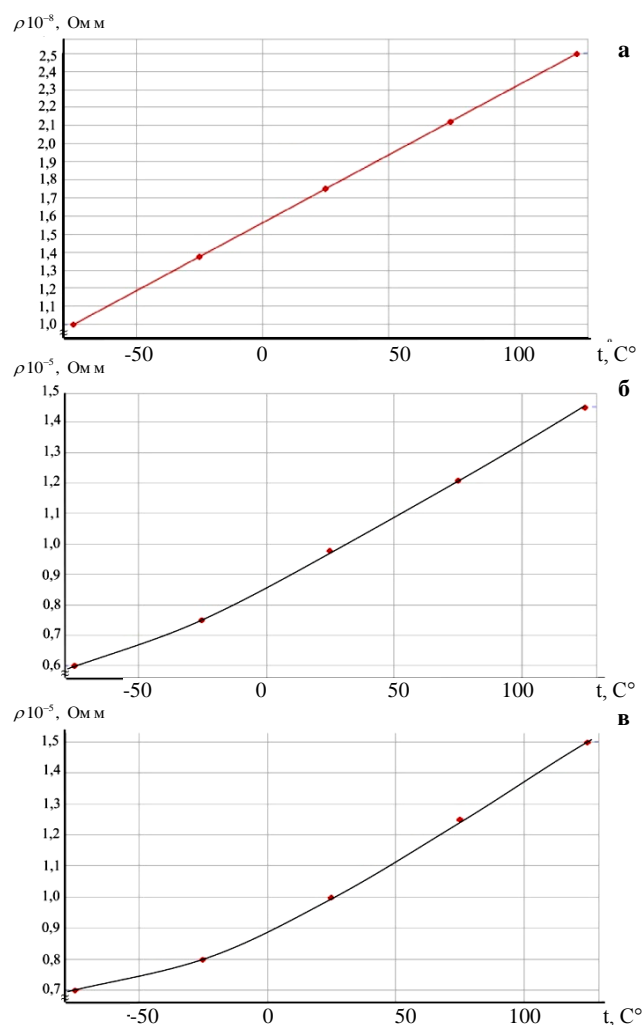


Рис. 3. Зависимости удельного сопротивления материалов от температуры для меди (а), полупроводника p -типа (б) и полупроводника n -типа (в)

Для каждого элемента данной модели были присвоены указанные ранее материалы, а также были заданы следующие условия: напряжение (задается на концах токоведущих пластин для начального момента времени 0 В), ток (в начальный момент времени также 0 А), температура «горячей» стороны (для примера – 80 $^\circ\text{C}$), температура «холодной» стороны (20 $^\circ\text{C}$).

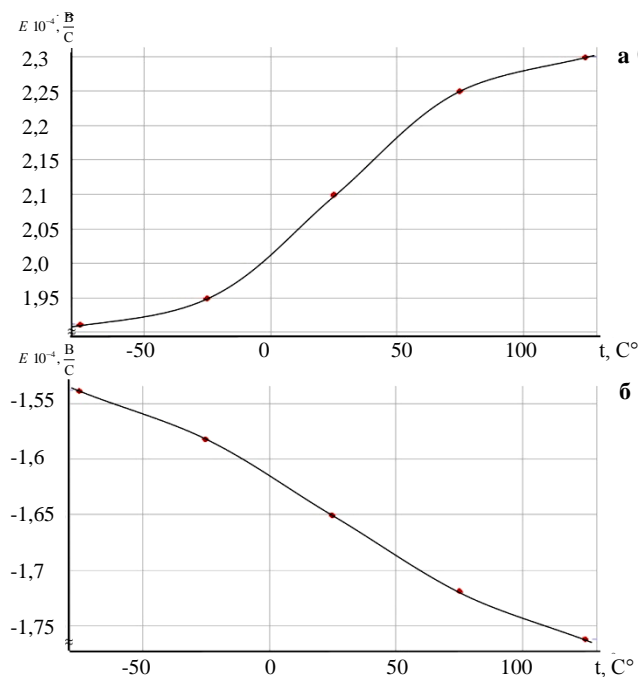


Рис. 4. Зависимости коэффициента Зеебека от температуры для полупроводника р-типа (а) и п-типа (б)

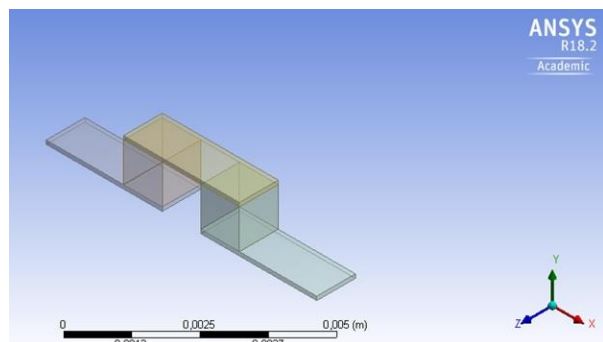


Рис. 5. Геометрия термоэлектрической ячейки

Помимо прочего, для правильной работы программы необходимо идентифицировать физические величины, которые требуется получить в результате расчета данной модели [11]. Основные параметры – это распределение электрического потенциала и картина распределения температуры. Таким образом, данная модель приближена к реальным условиям испытаний.

На последующем этапе программный комплекс автоматически рассчитывает указанные параметры заданным методом. Поскольку рассчитывается статическая 3D задача и количество элементов сетки относительно невысокое, то время расчета небольшое.

Результаты моделирования в программном комплексе ANSYS Workbench

Анализ результатов расчета представляет собой наглядное представление результатов моделирования, изображенное на **рис. 6** для распределения температур и **рис. 7** для потенциалов. Конечный результат может быть представлен в различных вариантах, например, таких как разбиение на сетку конечных элементов, разбиение и выделение зон распространения исследуемой характеристики или же в виде плавных переходов зон заданного параметра.

Полученные данные для температуры горячей стороны 80°C и температуры холодной стороны 20°C свидетельствуют о том, что элементарная термоэлектрическая ячейка генерирует около 0,023 В при перепаде температур 60°C.

Поскольку в стандартном модуле Пельтье 127 ячеек, то ЭДС холостого хода модуля Пельтье находится

$$E_{xx} = nE_0, \quad (1)$$

где n – число ячеек;

E_0 – ЭДС холостого хода одной ячейки.

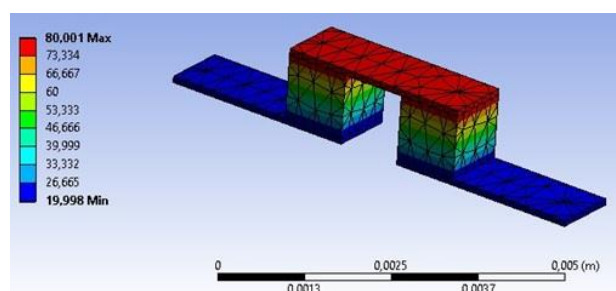


Рис. 6. Результат расчета по распределению температуры

Следовательно, в данном режиме работы модуль Пельтье будет вырабатывать

$$E_{xx} = 127 \cdot 0,023 \approx 3,0 \text{ В}.$$

Результат опыта холостого хода созданной 3D модели и характеристики, снятые ранее с элемента Пельтье ТЕС-060 [10], представлены на **рис. 8**.

Величина аппроксимации полученных в ходе экспериментов характеристик холостого хода и смоделированных составляет не более 1%. Кроме того, из уравнений графиков видно практически абсолютное совпадения экспериментальных исследований и результатов расчета, что говорит о высокой точности моделирования. Различие в коэффициенте тангенса угла наклона объясняется тем, что модель не учитывает тепловое сопротивление керамических пластин [11].

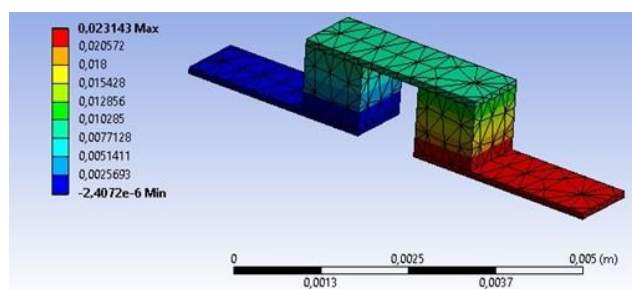


Рис. 7. Результат расчета по распределению потенциала

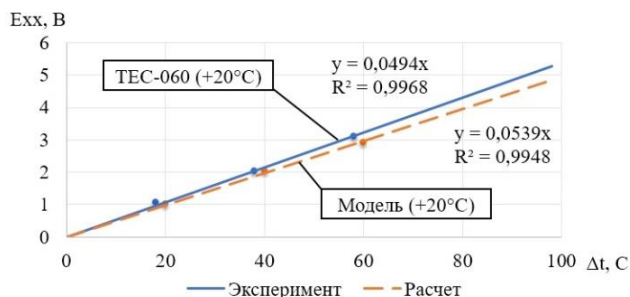


Рис. 8. Расчетные и экспериментальные результаты холостого хода

Для исследования нагрузочных режимов р-п перехода в среде ANSYS дополним геометрию модели перемычкой, как показано на рис. 9.

Для того чтобы перемычка работала как резистор с возможностью изменения величины сопротивления, необходимо производить регулировку величины удельного сопротивления перемычки, не изменяя ее геометрии [12]:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S}, \quad (2)$$

где R – Сопротивление активного проводника, Ом;
 ρ – Удельное сопротивление материала, Ом м;
 l – длина активного проводника, м;
 S – площадь поперечного сечения активного проводника, мм².

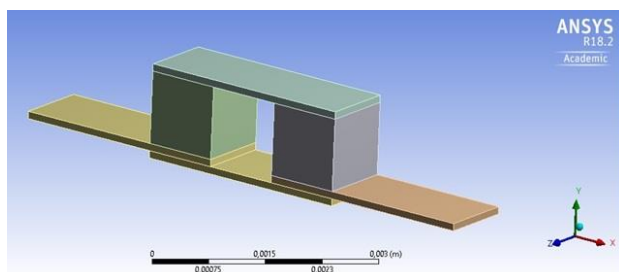


Рис. 9. Геометрия термоэлектрической ячейки с перемычкой

Так, при длине и ширине активного проводника в 1 мм и толщине пластины 0,1 мм зададим удельное сопротивление материала 0,001 Ом·м. Получим:

$$R = \frac{0,001 \cdot 1 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1 \cdot 10^{-3}} = 10 \text{ Ом}.$$

Далее выполняем все операции, как при создании предыдущей модели, дополнив список выходных величин общей плотностью тока.

Результаты моделирования при нагрузке в 10 Ом и перепаде температур 60°C для распределения электрического потенциала изображены на рис. 10 и для плотности тока на рис. 11.

Для оценки удельной величины тока I_{y0} , протекающего по активному проводнику, необходимо вычислить ток, протекающий по 0,1 части проводника, от плотности тока на 1 мм², равный 0,02 А/мм². Получим

$$I_{y0} = 0,1 \cdot 0,02 = 0,002 \frac{\text{А}}{\text{мм}}$$

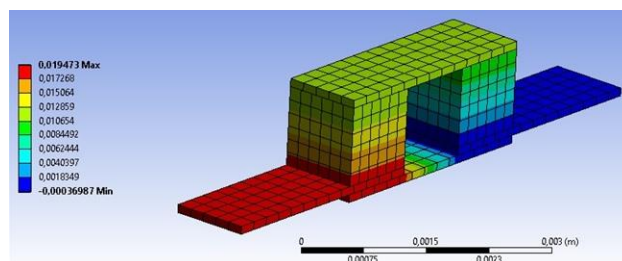


Рис. 10. Расчет электрического потенциала при нагрузке

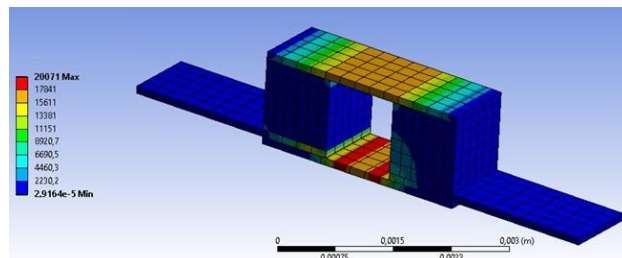


Рис. 11. Расчет плотности тока

Анализируя полученные величины электрического потенциала, равного 0,02 В, и удельной плотности тока, равной 0,002 А/мм, в сравнении с характеристиками холостого хода, можно сделать вывод о правильности расчетов, так как происходит просадка напряжения на нагрузке. Однако для полноценного исследования нагрузочных характеристик необходима более детальная проработка модели и учет таких параметров, как тепловое сопротивление керамических пластин, рассеивание части подведенной тепловой энергии через модуль Пельтье, потери по закону Джоуля-Ленца и прочих параметров.

Заключение

Таким образом, проведенные исследования показали рациональность использования термоэлектрических модулей Пельтье для генерации электроэнергии. Наиболее высокого значения КПД возможно добиться при работе на максимально допустимых температурах сторон термоэлектрического модуля. Главные преимущества предлагаемого устройства по сравнению с аналогичными – относительная простота, а соответственно, высокая надежность и длительный срок службы, автономность, универсальность применения, возможность утилизации тепла.

Список литературы

1. Шостаковский П.Г. Термоэлектрические источники альтернативного электропитания // Компоненты и технологии. 2010. Т. 1, №12. С. 131–138.
2. ГОСТ 6616-94. Преобразователи термоэлектрические. Общие технические условия. Минск, 1994. 15 с. (Система стандартов по информ., библи. и изд. делу).
3. Шостаковский П.Г. Альтернативные источники электрической энергии промышленного применения на основе термоэлектрических генераторов // Controlengineering Россия. 2013. Т. 1, №3. С. 52–56.
4. Лебедев Ю.П., Сидоркин А.Ф., Пармоник А.Ю. Оценка применимости и взаимозаменяемости модулей Пельтье // Современные фундаментальные и прикладные исследования. 2011. Т.1, №1. С. 26–28.
5. Шостаковский П.Г. Термоэлектрические генераторы промышленного применения. Ч. 2 // Современная электроника. 2016. Т. 1, №1. С. 2–5.
6. Шостаковский П.Г. Современные решения термоэлектрического охлаждения для радиоэлектронной, медицинской и бытовой техники. Ч. 2 // Компоненты и технологии. 2010. Т. 1, №1. С. 130–137.
7. Сандалов В.М., Романов К.В. Автономное зарядное устройство на базе модуля Пельтье // Наука ЮУрГУ [Электронный ресурс]. 2017. Т. 1, №1. С. 523–529.
8. Андреев С.А., Судник Ю.А., Петрова Е.А., Бессонов К.Е., Богаченков А.Г. Отопительно-варочная печь: пат. 138737 России. 2013. Бюл. №8.
9. Милкин В.И., Калитенков Н.В., Коробко А.Н. Электрогенерирующее отопительно-варочное устройство: пат. 98231 России. 2010. Бюл. №28.
10. Шостаковский П.Г. Термоэлектрические генераторы промышленного применения. Ч. 1 // Современная электроника. 2016. Т. 1, №1. С. 2–7.
11. Шостаковский П.Г. Современные решения термоэлектрического охлаждения для радиоэлектронной, медицинской и бытовой техники. Ч. 1 // Компоненты и технологии. 2009. Т. 1, №12. С. 40–46.
12. Головкин Д.Б., Скрипник Ю.А., Ментковский Ю.Л., Глазков Л.А., Химичева А.И. Способ определения коэффициента Пельтье неоднородной электрической цепи и устройство для его осуществления: пат. 2124734 России. 1999. Бюл. №2.
13. Шостаковский П.Г. Современные термоэлектрические источники питания электронных устройств // Компоненты и технологии. 2015. Т. 1, №1. С. 14–19.
14. Штерн Ю.И., Кожевников Я.С., Никаноров М.Д., Крикун Е.А., Штерн М.Ю. Термоэлектрический модуль: пат. 2007134625 России. 2009. Бюл. №23.
15. Бурштейн А.И. Физические основы расчета термоэлектрических устройств. М.: Физматлит, 1962. 136 с.
16. Жуйков А.О., Лушников И.Л. Термоэлектрический модуль Пельтье и его применение // Современные проблемы телекоммуникаций: межвуз. сб. науч. тр. Новосибирск: СибГУТИ, 2016. Т. 1. С. 578–582.
17. Иванов А.С., Прилепо Ю.П., Чернышова Т.И., Варламов С.А. Монолитная генераторная термоэлектрическая батарея: пат. 93584 России. 2010. Бюл. №12.
18. Долгих П.П., Иброгимов Р.И. Перспективы применения термоэлектрических установок для электроснабжения децентрализованных потребителей // Эпоха науки. 2016. Т. 1, №8. С. 281–289.
19. Термоэлектрическое охлаждение / А.Ф. Иоффе, Л.С. Стильбанс, Е.К. Иорданшвили, Т.С. Ставицкая. М.; Л.: АН СССР, 1956. 114 с.
20. Шостаковский П.Г. Разработка термоэлектрических систем охлаждения и термостатирования с помощью компьютерной программы Cryotherm // Компоненты и технологии. 2010. Т. 1, №8. С. 27–36.
21. Шостаковский П.Г. Тепловой контроль объектов на базе термоэлектрических сборок // Компоненты и технологии. 2011. Т. 1, №9. С. 142–150.

Поступила 22.11.18

Принята в печать 03.12.18

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-57-64>

SIMULATING THE PELTIER THERMOELECTRIC MODULE IN THE ELECTRICITY GENERATION MODE IN THE ANSYS WORKBENCH ENVIRONMENT

Konstantin V. Romanov – master's student

South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: kost.romanov2012@yandex.ru

Alexander V. Motorin – master's student

South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: assasins546@yandex.ru

Evgeny V. Solomin – Professor

South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: solominev@susu.ru

Anton A. Kovalyov – master's student

South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: alpenglowl305@yandex.ru

Ilya I. Diachenko – master's student

South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: djachenkoig@gmail.com.

Rishat G. Galeev – master's student

South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: rishat-galeev@mail.ru.

Abstract. In the global community, increasing attention is paid to alternative energy sources. The Peltier module is the simplest converter of thermal energy into electrical energy and vice versa. At this stage of development of industry, technology, electronics and microprocessor technologies, the Peltier thermoelectric elements are mainly used as heat pumps. Due to their simplicity, high reliability, small size, relatively low cost and other advantages, the Peltier thermoelectric modules are considered as obvious sources of electrical energy. The study was made to determine the possibility of using the Peltier thermoelectric modules in the qualitative conversion of thermal energy into electrical energy, as well as to establish the most efficient modes of operation of the Peltier elements as generators of electrical energy. In the course of the research, work was done aimed at creating a model, analyzing various static modes of power generation and studying the Peltier modules in the mode of an electric power generator. The operation modes of the elementary cell of the Peltier thermoelectric module were simulated in the ANSYS Workbench environment. The mathematical analysis of the simulation results was performed. The performance characteristics of the Peltier thermoelectric elements were determined, the results were processed. The conditions of maximum efficiency of conversion of thermal energy into electrical energy by the Peltier thermoelectric module were revealed. The optimal modes should be considered to be heating one of the sides of the Peltier module to a temperature close to the permissible value. The operation modes of thermoelectric elements were determined, the results were processed. A device based on the Peltier thermoelectric modules can be used as a portable accumulator battery charging device for gadgets and television and radio communication facilities.

Keywords: Peltier module, thermoelectric converter, alternative energy, heat and power engineering, thermal energy utilization, electric power industry.

References

- Shostakovskiy P.G. Thermoelectric sources of alternative power supply. *Komponenty i tekhnologii* [Components and Technologies], 2010, vol. 1, no. 12, pp. 131–138. (In Russ.)
- GOST 6616-94 Thermoelectric converters. General specifications. Minsk, 1994. I, 15 p. (System of standards on information, library services, and publishing).
- Shostakovskiy P.G. Alternative sources of electrical energy for the industrial use based on thermoelectric generators. *Control Engineering Russia*, 2013, vol. 1, no. 3, pp. 52–56. (In Russ.)
- Lebedev Yu.P., Sidorkin A.F., Parmonik A.Yu. Evaluation of applicability and interchangeability of Peltier modules. *Mezhdunarodnoe nauchnoe izdanie Sovremennye fundamentalnye i prikladnye issledovaniya* [International scientific journal Modern Fundamental and Applied Research], 2011, vol.1, no. 1, pp. 26–28. (In Russ.)
- Shostakovskiy P.G. Thermoelectric generators for industrial applications. Part 2. *Sovremennaya elektronika* [Modern Electronics], 2016, vol. 1, no. 1, pp. 2–5. (In Russ.)
- Shostakovskiy P.G. Modern solutions of thermoelectric cooling for radioelectronic, medical and household appliances. Part 2. *Komponenty i tekhnologii* [Components and Technologies], 2010, vol. 1, no. 1, pp. 130–137. (In Russ.)
- Sandalov V.M., Romanov K.V. Peltier module-based portable charger. *Nauka YuUrGU* [Science of SUSU] [Electronic resource], 2017, vol. 1, no. 1, pp. 523–529. (In Russ.)
- Andreev S.A., Sudnik Yu.A., Petrova E.A., Bessonov K.E., Bogachenkov A.G. Heating-cooking oven. Patent RF 138737, no. 2013141054/03, Bul. no. 8. (In Russ.)
- Milkin V.I., Kalitenkov N.V., Korobko A.N. Electric generating heating and cooking device. Patent RF 98231, no. 2010114538/03, Bul. no. 28. (In Russ.)
- Shostakovskiy P.G. Thermoelectric generators for industrial applications. Part 1. *Sovremennaya elektronika* [Modern Electronics], 2016, vol. 1, no. 1, pp. 2–7. (In Russ.)
- Shostakovskiy P.G. Modern solutions of thermoelectric cooling for radioelectronic, medical and household appliances. Part 1. *Komponenty i tekhnologii* [Components and Technologies], 2009, vol. 1, no. 12, pp. 40–46. (In Russ.)
- Golovko D.B., Skripnik Yu.A., Mentkovskiy Yu.L., Glazkov L.A., Khimicheva A.I. Method for measuring of Peltier-effect rate on electric circuit with dissimilar conductors and device which implements said method. Patent RU02124734, no.5041443/09, Bul. no. 2. (In Russ.)
- Shostakovskiy P.G. Modern thermoelectric power supplies for electronic devices. *Komponenty i tekhnologii* [Components and Technologies], 2015, vol. 1, no. 1, pp. 14–19. (In Russ.)
- Shtern Yu.I., Kozhevnikov Ya.S., Nikanorov M.D., Krikun E.A., Shtern M.Yu. Thermoelectric module. Patent RF 2007134625, no. 2364803, Bul. no. 23. (In Russ.)
- Burshtein A.I. *Fizicheskie osnovy rascheta termoelektricheskikh ustroystv* [Physical basis for the calculation of thermoelectric devices]. Moscow: Fizmatlit, 1962, 136 p. (In Russ.)
- Zhuikov A.O., Lushnikov I.L. Thermoelectric Peltier module and its application. *Sovremennye problemy telekommunikatsiy: Mezhevuz. sb. nauchn. tr.* [Modern problems of telecommunications: Interuniversity collection of research papers].

- Novosibirsk: SibGUTI, 2016, vol. 1, pp. 578–582. (In Russ.)
17. Ivanov A.S., Prilepo Yu.P., Chernyshova T.I., Varlamov S.A. Monolithic generator thermoelectric battery. Patent RF 93584, no. 2009130652/22, Bul. no. 12. (In Russ.)
18. Dolgikh P.P., Ibragimov R.I. Prospects of application of thermoelectric installations for power supply to decentralized consumers. *Epokha nauki* [The Era of Science], 2016, vol. 1, no. 8, pp. 281–289. (In Russ.)
19. Ioffe A.F., Stilbans L.S., Iordanshvili E.K., Stavitskaya T.S. *Termoelektricheskoe okhlazhdenie* [Thermoelectric cooling]. Moscow, Leningrad: Academy of Sciences of the USSR, 1956, 114 p. (In Russ.)
20. Shostakovsky P.G. Development of thermoelectric cooling systems and thermostating using the Kryotherm computer program. *Komponenty i tekhnologii* [Components and Technologies], 2010, vol. 1, no. 8, pp. 27–36. (In Russ.)
21. Shostakovsky P.G. Thermal control of objects based on thermoelectric assemblies. *Komponenty i tekhnologii* [Components and Technologies], 2011, vol. 1, no. 9, pp. 142–150. (In Russ.)

Received 22/11/18

Accepted 03/12/18

Образец для цитирования

Моделирование термоэлектрического модуля Пельтье в режиме генерации электроэнергии в среде ANSYS Workbench / Романов К.В., Моторин А.В., Соломин Е.В., Ковалёв А.А., Дьяченко И.И., Галеев Р.Г. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №4. С. 57–64. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-57-64>

For citation

Romanov K.V., Motorin A.V., Solomin E.V., Kovalyov A.A., Diachenko I.I., Galeev R.G. Simulating the Peltier thermoelectric module in the electricity generation mode in the ANSYS Workbench environment. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 4, pp. 57–64. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-57-64>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Абдрахманов Роберт Назымович – канд. техн. наук, инженер-технолог, ООО «ЕвроСинтез», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: rna@evrosintez.ru

Абдрахманова Ригина Назымовна – аспирант, ООО «ЕвроСинтез», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: arn@evrosintez.ru

Атрошенко Светлана Алексеевна – д-р техн. наук, проф., ст. науч. сотр., Институт проблем машиноведения РАН, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: satroshe@mail.ru

Безик Анна Сергеевна – аспирант кафедры компьютерного моделирования и нанотехнологий, Южно-Уральский государственный университет (НИУ), г. Челябинск, Россия.

Биндарева Кристина Андреевна – студент магистратуры Института цветных металлов и материаловедения, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия.

Великанов Владимир Семенович – канд. техн. наук, доц., проф. каф. горных машин и транспортно-технологических комплексов, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: rizhik_00@mail.ru. ORCID 0000-0001-5581-2733

Галеев Ришат Гайнитдинович – магистрант кафедры «Электрические станции, сети и системы электроснабжения» Политехнического института, студент-магистр, Южно-Уральский государственный университет (НИУ), г. Челябинск, Россия. E-mail: rishat-galeev@mail.ru

Дитковская Юлия Дмитриевна – аспирант кафедры обработки металлов давлением Института цветных металлов и материаловедения, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия.

Дьяченко Илья Игоревич – магистрант кафедры «Электрические станции, сети и системы электроснабжения» Политехнического института, студент-магистр, Южно-Уральский государственный университет (НИУ), г. Челябинск, Россия. E-mail: djachenkoig@gmail.com

Ковалёв Антон Александрович – магистрант кафедры «Электрические станции, сети и системы электроснабжения» Политехнического института, студент-магистр, Южно-Уральский государственный университет (НИУ), г. Челябинск, Россия. E-mail: alpenglowlow305@yandex.ru

Коссов Денис Юрьевич – директор ООО «ЕвроСинтез», г. Москва, Россия. E-mail: denis.kossov@gmail.com

Липатников Андрей Владимирович – ведущий специалист группы математического моделирования и системно-аналитических исследований научно-технического центра, ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: lipatnikov.av@mmk.ru

Лопатин Владимир Александрович – студент магистратуры Института цветных металлов и материаловедения, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия.

Лопатина Екатерина Сергеевна – канд. техн. наук, доц. кафедры металловедения и термической обработки металлов Института цветных металлов и материаловедения, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия.

Ляшенко Василий Иванович – канд. техн. наук, ст. науч. сотр., начальник научно-исследовательского отдела Государственного предприятия «Украинский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт промышленной технологии», г. Желтые Воды, Украина. E-mail: vilyashenko2017@gmail.com

Маковецкий Александр Николаевич – канд. техн. наук, начальник отдела новых марок сталей и термообработки, ПАО «Челябинский трубопрокатный завод», г. Челябинск, Россия. E-mail: Aleksandr.Makovetskiy@chelpipe.ru

Мирзасев Джалал Аминович – д-р физ.-мат. наук, проф. кафедры компьютерного моделирования и нанотехнологий, Южно-Уральский государственный университет (НИУ), г. Челябинск, Россия. E-mail: mirzaevda@susu.ru

Моторин Александр Владимирович – магистрант кафедры «Электрические станции, сети и системы электроснабжения» Политехнического института, студент-магистр, Южно-Уральский государственный университет (НИУ), г. Челябинск, Россия. E-mail: assasins546@yandex.ru

Нефедьев Алексей Павлович – директор по развитию ООО «ЕвроСинтез», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: nap@evrosintez.ru

Орехова Наталья Николаевна – д-р техн. наук, проф., Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: n_orehova@mail.ru

Панфилова Ольга Рашидовна – канд. техн. наук, доц. каф. горных машин и транспортно-технологических комплексов, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: halikova@inbox.ru. ORCID 0000-0001-6395-6948

Романов Константин Валерьевич – магистрант кафедры «Летательные аппараты» Политехнического института, студент-магистр, SPIN-код: 3441-4948, Researcher ID: W-7916-2018, Южно-Уральский государственный университет (НИУ), г. Челябинск, Россия. E-mail: kost.romanov2012@yandex.ru

Сидельников Сергей Борисович – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой обработки металлов давлением Института цветных металлов и материаловедения, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия. E-mail: sbs270359@yandex.ru

Созыкин Сергей Анатольевич – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры компьютерного моделирования и нанотехнологий, Южно-Уральский государственный университет (НИУ), г. Челябинск, Россия. E-mail: sozykinsa@susu.ru

Соломин Евгений Викторович – д-р техн. наук, проф. кафедры «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», Researcher ID: A-2409-2014, Южно-Уральский государственный университет (НИУ), г. Челябинск, Россия. E-mail: solominev@susu.ru. ORCID 0000-0002-4694-0490

Степанов Евгений Николаевич – канд. техн. наук, ведущий специалист группы агло-кокс-доменного производства научно-технического центра, ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: stepanov.en@mmk.ru

Усов Игорь Геннадьевич – канд. техн. наук, доц. каф. горных машин и транспортно-технологических комплексов, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: usov_ig@list.ru. ORCID 0000-0002-7642-3603

Фишер Ханс-Бертрам – д-р техн. наук, проф., Bauhaus-Universität Weimar, Веймар, Германия. E-mail: ibausil@uni-weimar.de

Хоменко Олег Евгеньевич – д-р техн. наук, проф. кафедры подземной разработки месторождений, Национальный технический университет «Днепропетровская политехника» Министерства образования и науки Украины, г. Днепр, Украина. E-mail: rudana.in.ua@gmail.com

Чибисова Елена Сергеевна – аспирант кафедры обработки металлов давлением Института цветных металлов и материаловедения, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия.

Шмелёва Анна Евгеньевна – ведущий экономист группы математического моделирования и системно-аналитических исследований научно-технического центра, ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: stepanova.ae@mmk.ru

Шнайдер Дмитрий Александрович – д-р техн. наук, проф. кафедры автоматики и управления, Южно-Уральский государственный университет (НИУ), г. Челябинск, Россия. E-mail: shnayder.da@mmk.ru

УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

Мы приглашаем Вас к участию в нашем журнале в качестве авторов, рекламодателей и читателей.

Журнал формируется по разделам, отражающим основные направления научной деятельности ученых МГТУ, в частности:

- РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ.
- МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ.
- ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ.
- ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО
- ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ.
- МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ.
- СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ.
- МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.
- НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ.
- ЭНЕРГЕТИКА МЕТАЛЛУРГИИ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ.
- УПРАВЛЕНИЕ, АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕТАЛЛУРГИИ.
- СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И СТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕТАЛЛУРГИИ.
- ЭКОЛОГИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ.
- ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И РЫНОК ПРОДУКЦИИ.
- СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ, ПОДГОТОВКА И ОБУЧЕНИЕ СПЕЦИАЛИСТОВ.
- ИНФОРМАЦИЯ И др.

ТРЕБОВАНИЯ К СТАТЬЯМ, ПРИНИМАЕМЫМ К ПУБЛИКАЦИИ

1. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СТАТЬИ (на русском и английском языках)

1.1. Наименование статьи (не более 15 слов). Должно кратко отражать содержание статьи. Не рекомендуется использовать сокращения и аббревиатуры.

1.2. Аффiliation. Указывается фамилия, имя, отчество авторов (транслитерация), ученая степень, звание, должность, индивидуальный авторский идентификатор ORCID, полное название организации (ее официально принятый английский вариант), адрес электронной почты хотя бы одного из авторов.

1.3. Аннотация (200–250 слов). Включает постановку задачи (актуальность работы), цель, используемые методы (эксперименты), новизну, результаты, практическую значимость (направления развития).

Онлайн-перевод запрещается!

1.4. Ключевые слова: от 5 до 15 основных терминов.

2. СТРУКТУРА ОСНОВНОЙ ЧАСТИ СТАТЬИ

2.1. Введение (постановка проблемы)

2.2. Теория, материалы и методы исследования, технические и технологические разработки

2.3. Результаты исследования и их обсуждение

2.4. Заключение (выводы)

2.5. Список литературы (на русском и английском языках)

3. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЬИ

3.1. Рекомендуемый объем статьи – 6–8 стр.

3.2. Текст статьи, сведения об авторах, аннотация, ключевые слова и список литературы представляются на электронном носителе в виде файла, созданного средствами **Microsoft Word**, и распечаткой на стандартных листах бумаги формата А4.

Внимание! Публикация статей является бесплатной. Преимущество опубликования предоставляется авторам и учреждениям, оформившим подписку на журнал.

Статьи проходят обязательное научное рецензирование.

Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям.

По вопросам публикации статей обращаться: 455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Редколлегия журнала «Вестник МГТУ им. Г.И. Носова», М.В. Чукину.

Телефоны: (3519) 29-85-26, 22-14-93.

E-mail: rio_mgtu@mail.ru; vestnik@magtu.ru (с указанием темы сообщения «Вестник МГТУ»).

При наборе статьи в **Microsoft Word** рекомендуются следующие установки:

- **шрифт** – **Times New Roman**, размер – 11 пт, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический;

- при вставке **формул** использовать встроенный редактор формул **Microsoft Equation** со стандартными установками, применяется только сквозная нумерация;

- **иллюстрации** не должны превышать ширины колонки (80 мм) или ширины страницы (170 мм). Для подписей элементов на иллюстрации используется шрифт TimesNewRoman 11 пт. Рисунки представляются в редакцию в двух форматах: редактируемом и не редактируемом (*.jpg; качество не менее 300 dpi). В тексте статьи должны быть подрисуночные подписи в местах размещения рисунков. В конце подписи к рисунку точка не ставится. Например:

Рис. 4. Расчётная зависимость $\gamma(t) = I_{\text{н}}/I_{\text{н0}}$ от времени и удалённости КЗ от выводов асинхронного двигателя

- **таблицы** нумеруются, если их число более одной. Заголовков необходимо, когда таблица имеет самостоятельное значение, без заголовка дают таблицы вспомогательного характера.

3.3. При подготовке рукописи необходимо руководствоваться Международной системой единиц **СИ**.

4. ДОКУМЕНТЫ, ПРИЛАГАЕМЫЕ К СТАТЬЕ

4.1. Экспертное заключение о возможности опубликования.

4.2. Договор.