

ВЕСТНИК

Магнитогорского государственного технического
университета им. Г.И. Носова

2016.Т. 14, №1

Журнал включен в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, а также входит в базы данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) и ВИНТИ. Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory». Электронные версии журнала размещаются на сетевом ресурсе Научной Электронной Библиотеки в сети Интернет.

Издается с марта 2003 года

Редакционный совет

Председатель редсовета:

Колокольцев В.М. – ректор ФГБОУ ВПО «МГТУ»,
проф., д-р техн. наук, Магнитогорск, Россия.

Члены редсовета:

Горлач И. – д-р наук в области машиностроения;
руководитель отделения мехатроники университета
им. Нельсона Манделы, Южная Африка;
Дабала М. – профессор, Факультет промышленного
инжиниринга Университета г. Падуа, Италия;
Дыя Х. – проф., д-р техн. наук, директор
Института обработки металлов давлением
и инженерии безопасности, Ченстоховский
Технологический Университет, Ченстохова, Польша;
Дюссан Р.О. – профессор, Руководитель факультета
металлургических технологий и наук о материалах,
Технологический институт, Мумбай, Индия;
Кавалла Р. – профессор, директор института
обработки металлов давлением, Фрайбергская горная
академия, Фрайберг, Германия;
Каплунов Д.Р. – член-кор. РАН, проф. ИПКОН РАН,
д-р техн. наук, Москва, Россия;
Мори К. – профессор Технологического
университета, Тойохаси, Япония;
Найзабеков А.Б. – академик, д-р техн. наук, проф.,
ректор Рудненского индустриального института,
Рудный, Казахстан;
Пьетшик М. – профессор горно-металлургической
академии, Краков, Польша;

Рашиников В.Ф. – Председатель совета директоров
ОАО «ММК», проф., д-р техн. наук,
Магнитогорск, Россия;
Счастливец В.М. – зав. лабораторией ИФМ
УрО РАН; академик РАН, д-р техн. наук,
Екатеринбург, Россия.

Главный редактор:

Чукин М.В. – первый проректор-проректор
по научной и инновационной работе
ФГБОУ ВПО «МГТУ», проф., д-р техн. наук,
Магнитогорск, Россия.

Первый зам. главного редактора:

Гун Г.С. – советник ректора ФГБОУ ВПО
«МГТУ», проф., д-р техн. наук,
Магнитогорск, Россия.

Зам. главного редактора:

Корчунов А.Г. – проректор по международной
деятельности ФГБОУ ВПО «МГТУ», проф.,
д-р техн. наук, Магнитогорск, Россия.
Логунова О.С. – проф., д-р техн. наук,
ФГБОУ ВПО «МГТУ», Магнитогорск, Россия;

Ответственные секретари:

Полякова М.А. – доц., канд. техн. наук
ФГБОУ ВПО «МГТУ», Магнитогорск, Россия;
Шубина М.В. – доц., канд. техн. наук
ФГБОУ ВПО «МГТУ», Магнитогорск, Россия.

Редактор: Кутекина Н.В.

Технический редактор: Гаврусева К.В.

Перевод на английский: Баталова Ю.С.

© ФГБОУ ВПО «МГТУ», 2016

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, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38
Тел.: (3519) 22-14-93. Факс (3519) 23-57-60
URL: <http://www.vestnik.mgtu.ru>
E-mail: rio_mgtu@mail.ru; vestnik@mgtu.ru

Журнал подготовлен к печати издательским центром

МГТУ им. Г.И.Носова, 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38.
Отпечатан на полиграфическом участке МГТУ им. Г.И. Носова,
455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38.

Выход в свет 25.03.2016. Заказ 125. Тираж 500 экз. Цена свободная.

VESTNIK

of Nosov Magnitogorsk State Technical University

2016. Vol. 14, no. 1

The journal is included in a List of Russian peer-reviewed scientific journals where key scientific results of dissertations for degrees of a doctor and a candidate of sciences should be published, and incorporated into databases of the Russian Science Citation Index (RSCI) and the All-Russian Institute of Scientific and Technical Information. Information about the journal is annually published in Ulrich's Periodicals Directory, an international system providing information about periodical and serial publications. Online versions of the journal can be found in the Scientific Electronic Library collection on the Internet.

PUBLISHED SINCE MARCH, 2003

Editorial Board Members

Chairman:

Kolokoltsev V.M. – D. Sc., Prof., Rector
of Nosov Magnitogorsk State Technical University,
Magnitogorsk, Russia.

Honorary Board Members:

Gorlach I. – Ph.D., Head of Mechatronics Department,
Nelson Mandela Metropolitan University, South Africa.

Dabalà M. – Prof., Department of Industrial Engineering,
University of Padova, Italy.

Dyja H. – D.Sc., Prof., Director of the Institute
of Metal Forming and Engineering Security, Czestochowa
University of Technology, Czestochowa, Poland.

Dusane R.O. – Prof., Head of Metallurgical Engineering
& Materials Science Department, Institute of Technology
Bombay, India.

Kaplunov D.R. – D.Sc., Prof., Corresponding Member
of the Russian Academy of Sciences. Research Institute
of Comprehensive Exploitation
of Mineral Resources, Moscow, Russia.

Kawalla R. – Prof., Director of the Metal Forming Institute,
Freiberg University of Mining and Technology,
Freiberg, Germany.

Mori K. – Prof., Toyohashi University of Technology, Japan.

Nayzabekov A.B. – D.Sc., Prof., Member
of the Academy of Sciences, Rector of Rudny
Industrial Institute, Rudny, Republic of Kazakhstan.

Pietrzyk M. – Prof., Akademia Gorniczo-Hutnicza,
Krakow, Poland.

Rashnikov V.F. – D.Sc., Prof., Chairman
of the OJSC MMK Board of Directors,
Magnitogorsk, Russia.

Schastlivtsev V.M. – D. Sc., Chief of the Laboratory,
Institute of Metal Physics,
Ural Division of the Russian Academy of Sciences,
Academician of the Russian Academy of Sciences,
Yekaterinburg, Russia.

Editor-in-Chief:

Chukin M.V. – D.Sc., Prof., First Vice-Rector-
Vice-Rector for Science and Innovation,
Nosov Magnitogorsk State
Technical University, Magnitogorsk, Russia.

First Deputy Editor-in-Chief:

Gun G.S. – D. Sc., Prof., Adviser to the Rector,
Nosov Magnitogorsk State Technical University,
Magnitogorsk, Russia.

Deputy Editor-in-Chief:

Korchunov A.G. – D.Sc., Prof., Vice-Rector
for International Affairs, Nosov Magnitogorsk State
Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Logunova O.S. – D.Sc., Prof., Nosov
Magnitogorsk State Technical University,
Magnitogorsk, Russia.

Executive Editors:

Polyakova M.A. – Ph.D., Assoc. Prof.,
Nosov Magnitogorsk State
Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Shubina M.V. – Ph.D., Assoc. Prof.,
Nosov Magnitogorsk State Technical
University, Magnitogorsk, Russia.

Editor: Kutekina N.V.

Technical Editor: Gavrusseva K.V.

Translated into English: Batalova Yu.S.

© Federal State Budgetary Institution of Higher Professional Education
Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2016

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 455000, Chelyabinsk Region)

16+ in accordance with Federal Law #436-FZ dated 29.12.10

Editorial office:

38, pr. Lenina, city of Magnitogorsk 455000, Russia
Phone: +7 (3519) 221 493. Fax: +7 (3519) 235 760
URL: <http://www.vestnik.mgtu.ru>
E-mail: rio_mgtu@mail.ru; vestnik@mgtu.ru

Prepared for the publication by the NMSTU publishing center,
38, pr. Lenina, city of Magnitogorsk 455000, Russia
Printed by the NMSTU printing section,
38, pr. Lenina, city of Magnitogorsk 455000, Russia.
Publication date: 25.03.2016. Order 125. Circulation: 500. Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

Разработка полезных ископаемых	5
<i>Швабенланд Е.Е., Соколовский А.В., Пихлер М.</i> Выбор параметров послойно-порционной технологии при разработке сложноструктурных месторождений комбайнами фрезерного типа.....	5
<i>Каримова Л.М., Кайралапов Е.Т., Бухарицин В.О.</i> Дифференциальный термический анализ гранулированного чернового медного сульфидного концентрата забалансовой руды	12
Технологии переработки и утилизации техногенных образований и отходов.....	18
<i>Медяник Н.Л., Тусупбаев Н.К., Варламова И.А., Гирева Х.Я., Калугина Н.Л.</i> Удаление тяжелых металлов из растворов методом ионной флотации.....	18
<i>Соложенкин П.М., Кубак Д.А., Петухов В.Н.</i> Компьютерное моделирование сульфидных соединений с гидроксильными радикалами и прогноз их в качестве флотореагентов.....	26
Металлургия черных, цветных и редких металлов	34
<i>Ганин Д.Р., Дружков В.Г., Паньчев А.А., Шаповалов А.Н.</i> Пути использования местных минеральных ресурсов в агломерационном производстве АО «Уральская сталь»	34
Обработка металлов давлением	41
<i>Косматский Я.И.</i> Основные направления исследований в области совершенствования теории, технологии и оборудования трубопрессовых систем	41
<i>Константинов И.Л., Губанов И. Ю., Клеменкова Д.В., Астрашатов И.О., Сидельников С.Б., Горохов Ю.В.</i> Методология модернизации технологии горячей объемной штамповки алюминиевых сплавов методом компьютерного моделирования	46
<i>Бирюков М.А., Песин А.М., Чукин М.В., Картунов А.Д., Бакишинов В.А., Бирюков А.В.</i> Разработка импортозамещающей технологии производства дюбель-гвоздей на основе численного моделирования методом конечных элементов.....	52
<i>Кушнарев А.В., Богатов А.А., Киричков А.А., Пузырев С.С.</i> Развитие технологии производства железнодорожных колес.....	59
Технологии обработки материалов	69
<i>Atroshenko S.A.</i> Behaviors of bulk metallic glass under shock loading	69

CONTENTS

Mineral Mining	5
<i>Schwabenland E.Ye., Sokolovsky A.V., Pichler M.</i> Selection of parameters of a layer-batch technology in mining of complex-structured field deposits with cold milling combined machines	5
<i>Karimova Ly.M., Kairalapov Ye.T., Bukharitsin V.O.</i> Differential thermal analysis of the pelleted rough copper sulphide concentrate of off-balance ore.....	12
Processing and Recycling Technology of Technogenic Formations and Wastes.....	18
<i>Medyanik N.L., Tussupbayev N.Ku., Varlamova I.A., Girevaya Kh.Ya., Kalugina N.L.</i> Removing of heavy metals from solutions by the ion flotation method	18
<i>Solozhenkin P.M., Kubak D.A., Petukhov V.N.</i> Computer-aided simulation of sulphidic compounds with hydroxyl radicals with forecast on their application as flotation reagents	26
Metallurgy of Ferrous, Non-Ferrous and Rare Metals	34
<i>Ganin D.R., Druzhkov V.G., Panychev A.A., Shapovalov A.N.</i> Use of local mineral resources at the sintering plant of the "Ural steel" joint stock company.....	34
Metal forming	41
<i>Kosmatsky Ya.I.</i> Main directions of research in the field of the pipe-extrusion system theory, technology and equipment improvment.....	41
<i>Konstantinov I.L., Gubanov I.Yu., Klemenkova D.V., Astrashabov I.O., Sidelnikov S.B., Gorokhov Yu.V.</i> Computer-simulated upgrading procedures of the hot aluminum-alloy forging process technology	46
<i>Biryukov M.A., Pesin A.M., Chukin M.V., Kartunov A.D., Bakshinov V.A., Biryukov A.V.</i> Development of an import-substituting technology of dowel-nails production the basis of numerical modelling with the finite-element method	52
<i>Kushnarev A.V., Kirichkov A.A., Bogatov A.A., Puzyrev S.S.</i> Railway wheel manufacturing process improvement	59
Materials Processing Technology.....	69
<i>Atroshenko S.A.</i> Behaviors of bulk metallic glass under shock loading	69

Материаловедение и термическая обработка металлов	79
<i>Brunelli K., Bruschi S., Ghiotti A., Lencina R., Dabalà M.</i> Hot shortness cracks formation in a low alloy steel: investigation on the critical conditions..... 79	
<i>Gromov V.E., Nikitina E.N., IvanovYu.F., Aksenova K.V., Semina O.A.</i> Bainite steel: structure and work hardening 87	
Стандартизация, сертификация и управление качеством	101
<i>Голубчик Э.М., Кузнецова А.С., Рубин Г.Ш., Гун Г.С., Дья Х.</i> Применение модели и принципов технологической адаптации показателей качества в процессах производства метизной продукции 101	
Теплоэнергетика металлургической отрасли	109
<i>Лобанов И.Е.</i> Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в продольно омываемых пучках труб с поперечными кольцевыми канавками с применением компаундной трёхслойной модели турбулентного пограничного слоя 109	
<i>Портянкин А.А., Тинькова С.М., Пискажова Т.В.</i> Учебно-консультационная компьютерная программа для изучения теплообменных процессов 116	
Экология металлургической отрасли.....	124
<i>Черчинцев В.Д., Нefeldова Е.В., Козлов А.С.</i> Экологические аспекты внедрения ресурсосберегающей бездоломитной технологии производства монокромата натрия на Новотроицком заводе хромовых соединений..... 124	
Экономика, управление и рынок продукции	130
<i>Сабадаш Ф.А., Толмачев О.М., Запужалов Н.М.</i> Модернизация машиностроительных предприятий на основе логистических систем KANBAN и Just-in-Time 130	
Сведения об авторах	137

Materials Science and heat treatment of metals	79
<i>Brunelli K., Bruschi S., Ghiotti A., Lencina R., Dabalà M.</i> Hot shortness cracks formation in a low alloy steel: investigation on the critical conditions79	
<i>Gromov V.E., Nikitina E.N., IvanovYu.F., Aksenova K.V., Semina O.A.</i> Bainite steel: structure and work hardening.....87	
Standardization, sertification, and quality management	101
<i>Golubchik E.M., Kuznetsova A.S., Rubin G.Sh., Gun G.S., Dyja H.</i> Application of models and principles of quality indicator technological adaptation in metalware production processes..... 101	
Heat Power Engineering of the Metallurgical Industry	109
<i>Lobanov I.E.</i> Mathematical modeling of the intensified heat transfer at a turbulent flow in longitudinal-flow tube bundles with lateral ring grooves with the aid of a compound three-layer model of the turbulent boundary layer 109	
<i>Portyankin A.A., Piskazhova T.V., Tinkova S.M.</i> Training-support software for studying heat exchange processes 116	
Ecology of the Metallurgical Industry	124
<i>Cherchintsev V.D., Nefedova Ye.V., Kozlov A.S.</i> Environmental aspects of implementation of resource-saving dolomite-free technologies of sodium monochromatee production at Novotroitsk Plant of Chromium Compounds 124	
Economics, management, and market of products.....	130
<i>Sabadash F.A., Tolmachev O.M., Zapuskalov N.</i> Modernization of machine-building enterprises on the basis of KANBAN and Just-in-Time logistics systems 130	
Information about authors	137

РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.272.63:622.232.72

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-1-5-12

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ПОСЛОЙНО-ПОРЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ СЛОЖНОСТРУКТУРНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КОМБАЙНАМИ ФРЕЗЕРНОГО ТИПА

Швабенланд Е.Е.¹, Соколовский А.В.², Пихлер М.³¹ ФГУП «ВИМС», Москва, Россия² ООО «НТЦ-Геотехнология», Челябинск, Россия³ Wirtgen International GmbH, Виндхаген, Германия

Аннотация. Одной из самых важных задач при разработке сложноструктурных месторождений полезных ископаемых является обеспечение минимальных значений потерь и разубоживания полезного ископаемого. При применении традиционной технологии разработки таких месторождений с предварительным рыхлением пород буровзрывным способом обеспечить выполнение данного условия достаточно проблематично. Помимо этого при разработке месторождений могут выдвигаться условия, ограничивающие применение буровзрывного способа подготовки пород к выемке по экологическим условиям либо ввиду нахождения вблизи месторождения охраняемых зданий и сооружений. В то же время промышленностью производятся фрезерные комбайны, которые способны разрабатывать как полускальные так и, частично, скальные породы без предварительной подготовки к выемке. Однако теоретического и практического опыта применения машин данного типа при разработке сложноструктурных залежей недостаточно, так как применение традиционной технологии послойного фрезерования пород приведет к перемешиванию различных типов руд и вскрышных пород, что существенно увеличит затраты на дальнейшую переработку сырья. Поэтому в ходе исследований была проведена оценка возможности и целесообразности применения фрезерных комбайнов на перспективном месторождении апатитовой руды Ошурковское. Было предложено разделить грузопоток извлеченной горной массы на порции, из которых формируются элементарные грузопотоки с заданными качественными характеристиками. Для контроля качества добываемой рудной массы в условиях Ошурковского месторождения был принят рентгенорадиометрический способ, определено место установки прибора на фрезерном комбайне. В результате исследований доказана целесообразность применения данного метода при разработке месторождения Ошурковское.

Ключевые слова: фрезерный комбайн, сложноструктурное месторождение, качество, потери, разубоживание, разработка месторождения.

Введение

Отличительной особенностью комбайнов фрезерного типа, например Wirtgen CSM, является выемка посредством «фрезерования» массива пород слоями фиксированной ширины и изменяемой глубины с формированием потока отбитой горной массы управляемого гранулометрического состава, которая отгружается в автосамосвалы, на конвейер или в штабель. Основная область применения таких комбайнов – разработка пластообразных относительно выдержанных залежей слоистого строения [1, 2, 7]. Такие месторождения имеют, как правило, значительные размеры в плане и визуально разли-

чимые границы слоев полезного ископаемого и пустых пород. Высокая экономическая эффективность достигается применением технологии отработки, включающей селективную выемку слоев полезного ископаемого и пород по глубине и валовую выемку полезного ископаемого и включений породы в плане. Фрезерными комбайнами могут без предварительного рыхления разрабатываться породы с пределом прочности на сжатие до 120 МПа [3–5, 8].

Перспективными для применения фрезерных комбайнов являются сложно-структурные месторождения [12, 13], характеризующиеся:

- неравномерным распределением и сложной конфигурацией рудных тел в плане и разрезе;
- различными качественными (содержание полезного компонента) и физико-механическими

(предел прочности на сжатие) характеристиками полезного ископаемого и пород;

- отсутствием видимых геологических границ между полезным ископаемым и вмещающими породами.

В частности, одним из таких сложноструктурных месторождений является Ошурковское апатитовое месторождение в Бурятии, расположенное в бассейне реки Селенга, впадающей в озеро Байкал. Апатитовая минерализация месторождения приурочена к сиенито-диоритам, занимающим около 87% площади, представлена рудными телами размером от 50×50 м и до 200×800 м. Практически всю остальную площадь месторождения занимают пустые породы. Резкой границы между пустыми породами и апатитовыми рудами нет.

Технические и технологические разработки

Апатит в массиве распространен повсеместно и неравномерно (коэффициент вариации равен 24,5%). Содержание полезного компонента P_2O_5 в среднем по месторождению составляет 3,89%, а в кондиционных рудах – 4,37% при бортовом содержании 3,5%. В рудных телах имеются включения участков некондиционной руды с содержанием P_2O_5 от 1 до 3,5% (в среднем 2,84%).

Участки кондиционной и некондиционной апатитовых руд образуют сплошные рудно-породные зоны различной формы, размеров и структуры. Соотношение кондиционных и некондиционных руд определяется коэффициентом рудоносности ($K_{руд}$), который в среднем для месторождения равен $K_{руд}=0,68$, изменяясь в пределах $K_{руд}=0,32÷1,0$.

Месторождение Ошурковское является типичным сложноструктурным месторождением со следующими особенностями (рис. 1):

- отсутствием геологических границ между пустой породой, некондиционной и кондиционной рудой;

- бессистемным чередованием в рудных зонах участков пустой породы и некондиционной руды, в породных зонах наличием участков кондиционной руды;

- неравномерным распределением полезного компонента в массиве и низким его содержанием, что требует минимизации примешивания вмещающих пород при добыче;

- относительно небольшим различием между содержаниями P_2O_5 в кондиционном и некондиционном полезном ископаемом;

- невозможностью прямого оперативного измерения содержания P_2O_5 в разрабатываемом массиве;

- наличием экологических ограничений, не позволяющих осуществлять отработку месторождения с применением БВР и механическим дроблением руды.

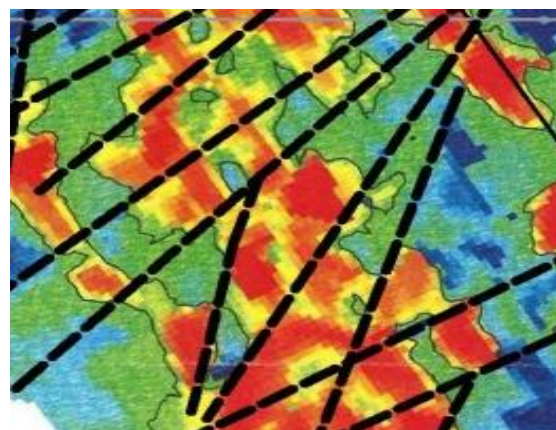


Рис. 1. Схема строения (план) месторождения Ошурковское:

- – кондиционная апатитовая руда с содержанием P_2O_5 более 4,5%;
- – кондиционная апатитовая руда с содержанием $4,5\% > P_2O_5 > 3,9\%$;
- – кондиционная апатитовая руда с содержанием $3,9\% > P_2O_5 > 3,5\%$;
- – некондиционная руда с содержанием $P_2O_5 < 3,5\%$ и пустая порода;
- – безрудные дайки;
- – геологические нарушения

В таких условиях при отработке рудного поля Ошурковского месторождения целесообразно применение фрезерных комбайнов с использованием традиционной послойно-полосовой технологии выемки, однако при этом неизбежно произойдет перемешивание кондиционной, некондиционной руды и пустой породы, что приведет к дополнительному снижению качества полезного ископаемого из-за его разубоживания. Очевидно, что главным недостатком послойно-полосовой технологии в рассматриваемых условиях является неконтролируемая валовая выемка горной массы, а устранение этого недостатка требует разработки дополнительных технических решений и приемов управления качественными характеристиками рудного потока.

Таким образом, при разработке сложно-

структурных месторождений, в частности Ошурковского апатитового, фрезерными комбайнами основной задачей, требующей решения, является разделение рудного потока на отдельные порции рудной массы с установленными качественными характеристиками. Для решения этой задачи потребовалось:

- определить рациональный размер порции рудной массы и, соответственно, грузоподъемности применяемого автосамосвала;
- разработать способ контроля качественных характеристик каждой порции рудной массы, загруженной в автосамосвалы;
- разработать методику управления качественными характеристиками потока рудной массы.

Размер вынимаемой порции определен методом статистического анализа размеров включений породных участков в рудные зоны, а рудных участков – в породные зоны. При этом установлено, что минимальное разубоживание, принятое в качестве критерия оценки результативности управления, достигается при формировании грузопотока порциями массой 25 т. Поэтому для отработки Ошурковского апатитового месторождения рекомендуется применение фрезерного комбайна Wirtgen CSM в комплексе с автосамосвалами грузоподъемностью 25 т.

Способ контроля качественных характеристик каждой порции рудной массы, загруженной в автосамосвалы, разработан на основе накопленного опыта крупнопорционной сортировки рудной массы при разработке месторождений различных полезных ископаемых [9–11, 14]. Из рассмотренных промышленных способов контроля качества добываемой рудной массы (авторадиометрический, фотонейронный, нейронно-активационный и др.) к реализации в условиях Ошурковского месторождения был принят рентгенорадиометрический способ, основанный на измерении потока характеристического гамма-излучения, наведенного с помощью радиометрического контрольно-измерительного комплекса. При этом было учтено, что определение содержания P_2O_5 возможно лишь косвенным методом по выбранному элементу-спутнику, который является индикатором полезного компонента и находится с ним в тесной корреляционной взаимосвязи. Исследования, выполненные на кусковом материале, показали, что для Ошурковского месторождения таким элементом-спутником P_2O_5 является стронций, по содер-

жанию которого возможно определить содержание полезного компонента в анализируемой порции горной массы.

Сущность определения содержания P_2O_5 с помощью радиометрического контрольно-измерительного комплекса заключается в следующем. Радиометрический контрольно-измерительный комплекс размещается на радиометрической контрольной станции (РКС), через которую пропускается автосамосвал с горной массой. При движении автосамосвала через РКС поверхность рудной массы несколько раз обрабатывается рентгеновскими лучами заданной мощности с помощью излучающего блока комплекса. Возникшее под их воздействием в элементе-спутнике вторичное характеристическое излучение измеряется и по его интенсивности, с помощью установленной зависимости, рассчитывают содержание P_2O_5 в порции рудной массы (рис. 2). Для получения статистически достоверных значений на измеряемой порции необходимо выполнить не менее 30 измерений.

Недостатком измерения содержаний в кузове автосамосвалов с помощью РКС является измерение содержания только в поверхностном слое порции горной массы, а результаты измерения затем распространяются на весь объем порции. При этом достоверность определения содержания снижается, что для Ошурковского месторождения имеет существенное значение. Поэтому для определения содержания P_2O_5 во всем объеме порции рудной массы, загруженной в автосамосвал, предложено установить радиометрический контрольно-измерительный комплекс непосредственно над разгрузочным конвейером фрезерного комбайна (рис. 3) на высоте 500–700 мм от поверхности движущейся горной массы.

На каждую порцию горной массы делается не менее 60 измерений, по которым рассчитывается среднее содержание в загруженной горной массе. В зависимости от среднего содержания в порции самосвал получает адрес разгрузки. Так, если среднее содержание полезного компонента выше промышленного, то порция будет отгружена на склад обогащательной фабрики, со средним содержанием выше бортового, но меньше промышленного – на временный склад для последующего предварительного обогащения, а горная масса с содержанием ниже бортового – в отвал (рис. 4).

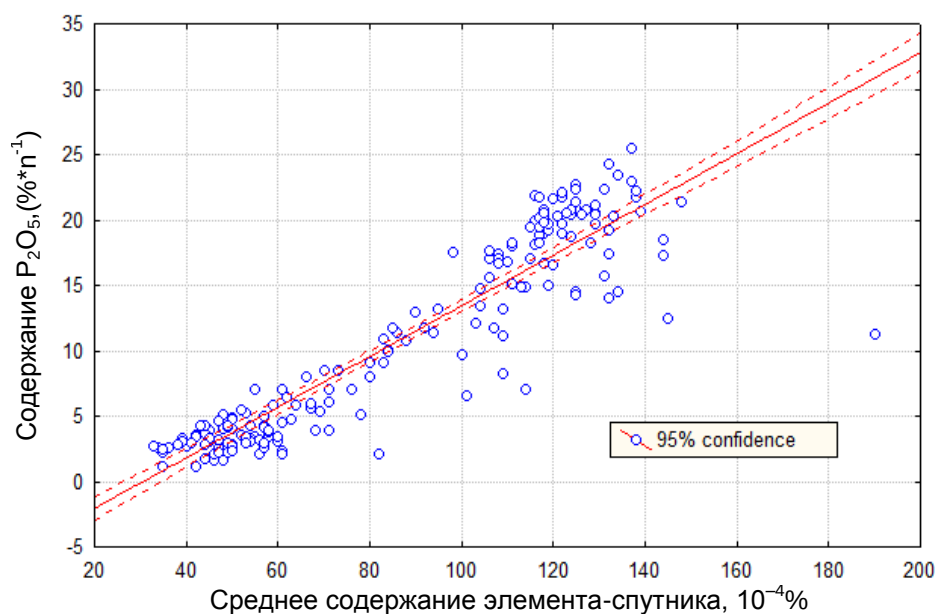


Рис. 2. График зависимости содержания P_2O_5 от содержания элемента-спутника

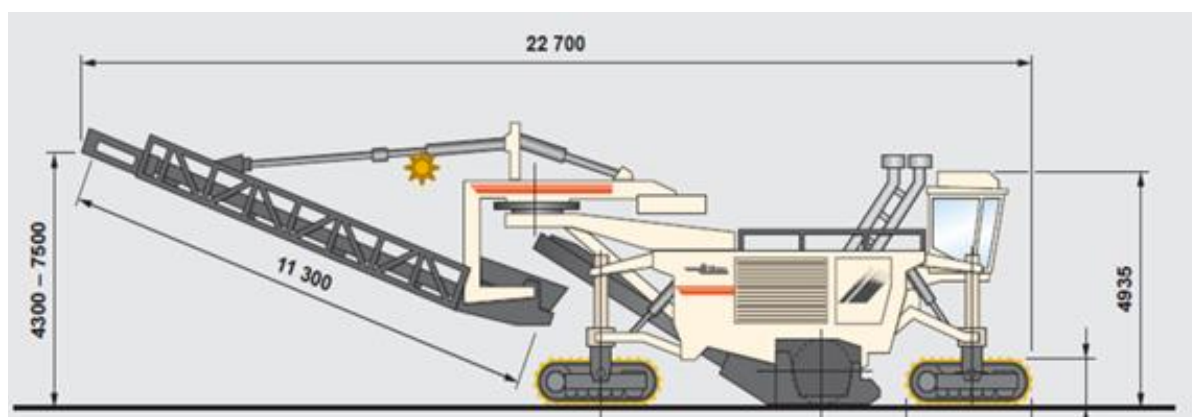


Рис. 3. Схема размещения контрольно-измерительного комплекса на фрезерном комбайне

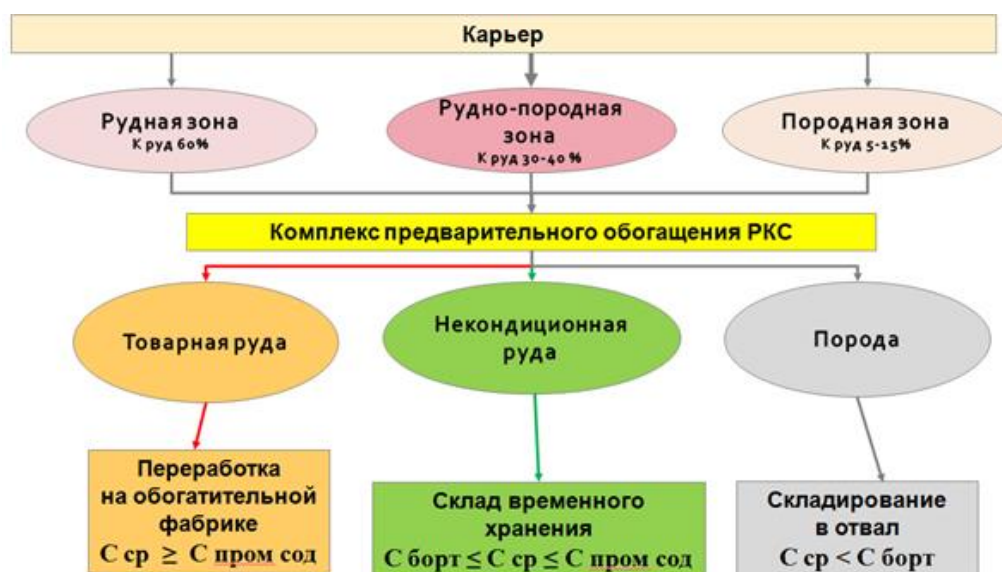


Рис. 4. Схема формирования грузопотоков с заданными качественными характеристиками

Разработанные технология послойно-порционной выемки руды и методика разделения потока горной массы на основе радиометрического экспресс-метода позволяет повысить полноту извлечения полезного ископаемого из недр.

Взаимосвязи показателей полноты извлечения полезного компонента из недр с горно-геологическими, технологическими и экономическими условиями добычи и предварительной сортировки руды с использованием радиометрического метода измерений покажем с помощью уравнений материального баланса [15]. При этом принято, что освоение месторождения должно быть прибыльным, т.е. должно соблюдаться условие

$$\sum C_{pm} \geq \sum C_i \text{ или } \sum C_{pm} - \sum C_i > 0, \quad (1)$$

где $\sum C_{pm}$ – суммарная извлекаемая ценность полезных компонентов из 1 т добытой рудной массы с учетом ценностей в примешанных вмещающих породах, руб.; $\sum C_i$ – суммарные затраты на получение готовой продукции из единицы добытой рудной массы, руб.

Разница между извлекаемой ценностью из 1 т добытой рудной массы и суммарными затратами на получение 1 т готовой продукции является удельной прибылью

$$P_{y\partial} = C_{pm} - \sum C_i \text{ или } C_{pm} = P_{y\partial} + \sum C_i. \quad (2)$$

Определение рациональной полноты извлечения балансовых запасов при добыче осуществляется с использованием ценностного подхода, который добычу полезных ископаемых рассматривает как процесс взаимодействия ценностей в балансовых запасах, теряемой части балансовых запасов и примешанных вмещающих породах, а результатом такого взаимодействия являются ценности в добытой рудной массе.

Для определения планируемого объема добычи в зависимости от величины балансовых запасов используется уравнение баланса ценностей, извлекаемых при добыче с предварительной сортировкой радиометрическим методом (D_{pm}^{pks}) и без нее (D_{pm}):

$$D_{pm}^{pks} = B \cdot K_{pks}^{\frac{p}{p}} + B(1 - K_{py\partial}) K_{pks}^{\frac{p}{n}}; \quad (3)$$

$$D_{pm} = B(1 - K_n + K_e) = B - \Pi + B, \quad (4)$$

где B , Π , B – соответственно количество балансовых запасов, потерь балансовых запасов, примешанных вмещающих пород; $K^{\frac{p}{p}}$, $K_{py\partial}$, $K_{pks}^{\frac{p}{n}}$ – соответственно коэффициент извлечения руды из рудной зоны ($K^{\frac{p}{p}} = 0,85$), коэффициент рудо-

носности ($K_{py\partial} = 0,68$), коэффициент извлечения руды из породной зоны ($K_{pks}^{\frac{p}{n}} = 0,20$).

Извлекаемая часть полезных компонентов из общего объема добытой горной массы, приносящая доход, может быть представлена в виде

$$a_{pm} = \frac{(B - \Pi) \cdot C_{\delta} + B \cdot C_{\epsilon}}{D_{pm}}; \quad (5)$$

$$a_{pks} = \frac{B \cdot C_{\delta} - \Pi_{pks} \cdot C_{\Pi}^{pks} + B_{pks} \cdot C_{\epsilon}^{pks}}{D_{pm}^{pks}}, \quad (6)$$

где a_{pm} , a_{pks} – содержание полезного компонента в добытой рудной массе без предварительной сортировки и с применением сортировки на РКС соответственно; C_{δ} , C_{ϵ} – содержание полезного компонента в потерянных балансовых запасах руды ($C_{\delta} = 4,0\%$) и примешанных вмещающих породах при добыче руды без предварительной сортировки ($C_{\epsilon} = 0,4\%$) соответственно; C_{Π}^{pks} , C_{ϵ}^{pks} – содержание полезного компонента в потерянных балансовых запасах руды ($C_{\Pi}^{pks} = 2,0\%$) и примешанных вмещающих породах при добыче руды с применением сортировки на РКС ($C_{\epsilon}^{pks} = 3,8\%$) соответственно; Π_{pks} , B_{pks} – потери и примешивание при добыче и предварительной сортировке на РКС.

Потери и примешивание руды при добыче с применением предварительной сортировки определяются по формулам:

$$\Pi_{pks} = B(1 - K_{pks}^{извл\ rуд}); \quad (7)$$

$$B_{pks} = B(1 - K_{py\partial}) K_{pks}^{\frac{p}{n}}. \quad (8)$$

В качестве основного показателя полноты извлечения балансовых запасов при добыче используется «коэффициент извлечения из недр ценностей», равный отношению ценности в 1 т добытой рудной массы к ценности 1 т погашенных балансовых запасов. Когда известны и достаточно надежно определены все составляющие показатели процесса разработки (например, по данным опытно-промышленной разработки или полной отработки первых добычных блоков) значение коэффициента K_n^u как результата работ вычисляется по формуле [15]

$$K_n^u = \frac{D_{pm} \cdot C_{pm}}{B \cdot C_{\delta}} \quad (9)$$

или в удельной форме

$$K_n = K_{кол} \cdot K_{кач}^{рм}, \quad (10)$$

где $K_{кол}$, $K_{кач}^{рм}$ – коэффициент количества добытой рудной массы и коэффициент изменения качества полезного ископаемого.

Представим ценности в 1 т добытой рудной массы и 1 т балансовых запасов как произведение содержания полезного компонента на его цену. Тогда выражение может быть преобразовано:

$$K_n^ч = \frac{D_{рм} C_{рм}}{B C_б} = \frac{D_{рм} \alpha_{рм} C_o}{B \alpha_b C_o} \cdot \frac{D_{рм} \cdot \alpha_{рм}}{B \cdot \alpha_b}. \quad (11)$$

Таким образом, в качестве основного показателя полноты извлечения балансовых запасов при добыче апатитовой руды может быть принят коэффициент извлечения из недр P_2O_5 , равный отношению его количества в 1 т добытой рудной массы к количеству в 1 т балансовых запасов.

Для определения полноты извлечения балансовых запасов при добыче апатитовой руды Ошурковского месторождения используем следующие данные:

- коэффициент извлечения руды из рудной зоны $K^{р/р} = 0,85$;
- коэффициент рудоносности $K_{руд} = 0,68$;
- коэффициент извлечения руды из породной зоны при добыче с применением предварительной сортировки на РКС $K_{ркс}^{р/п} = 0,20$;

- потери руды при добыче с применением предварительной сортировки на РКС $P_{ркс} = 0,15\%$;
- потери руды при добыче без применения предварительной сортировки на РКС $P_{ркс} = 0,12\%$;
- примешивание руды при добыче с применением предварительной сортировки на РКС $B_{ркс} = 0,06\%$;

- примешивание вмещающих пород при добыче без применения предварительной сортировки на РКС $B_{ркс} = 0,25\%$;

- содержание полезного компонента в потеранных балансовых запасах руды $C_b = 4,0\%$;

- содержание полезного компонента в примешенных вмещающих породах при добыче руды без предварительной сортировки $C_b = 0,4\%$;

- содержание полезного компонента в потеранных балансовых запасах руды $C_{п}^{ркс} = 2,0\%$;

- содержание полезного компонента в примешенных вмещающих породах при добыче руды с применением сортировки на РКС $C_b^{ркс} = 3,8\%$.

Отсюда показатели содержания полезного компонента в добытой рудной массе без предварительной сортировки и с применением сортировки на РКС рассчитанные по формулам (5) и

(6) составят: $a_{рм} = 3,09\%$, $a_{ркс} = 4,32\%$.

Соответственно коэффициенты извлечения из недр апатитовой руды: без предварительной сортировки $K^ч = 0,87\%$, с применением сортировки на РКС $K_{ркс}^ч = 1,02\%$.

Заключение

Полученные данные показывают, что технология послонно-порционной выемки руды на примере Ошурковского сложноструктурного месторождения и методика разделения потока горной массы на основе радиометрического экспресс-метода позволяют в 1,13 раза повысить полноту извлечения полезного ископаемого из недр; снизить до 5% уровень потерь и до 15% разубоживание добываемого сырья; улучшить условия труда рабочих; существенно уменьшить вредное воздействие на окружающую среду и более чем на 30% сократить эксплуатационные затраты горного производства.

Список литературы

1. Швабенланд Е.Е. О потенциале фрезерных комбайнов непрерывного действия при разработке месторождений открытым способом // Рациональное освоение недр. 2014. № 1.
2. Грабский А.А. Современное состояние и перспективы развития конструкций карьерных комбайнов // Горная Промышленность. 2010. №4 (92). С. 60–62.
3. Грабский А.А. Техническая производительность карьерного комбайна // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2010. №10. С. 206–210.
4. Зайцев Г. Д., Ческидов В. И. Оценка технологических и технических возможностей оборудования для безвзрывной добычи полезных ископаемых // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2006. №2. С. 222–227.
5. Бурмистров К.В., Колонюк А.А., Аргимбаев К.Р. Выбор комплексов оборудования для производства выемочно-погрузочных работ в стесненных условиях нижних горизонтов карьеров // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2010. №1 (29). С. 22–25.
6. Пихлер М., Панкевич Ю. Б., Панкевич М. Б. Технологии Wirtgen Surface Mining в горнодобывающей промышленности // Основные средства. 2011. №1. С. 58–64.
7. Final report on applicability of surface miner in nongtrai limestone mine of Lafarge Umiam Mining Pvt. Ltd in Meghalaya, India / Achyuta Krishna Ghosh, Dr/ Sujit Kumar Mondal, Santosh Kumar Singh, Dr. Amalendu Sinha : technical information brochures. – Central Institute of Mining & Fuel Research [Council of Scientific and Industrial Research] Department of Science & Technology, Government of India. July, 2010. http://luml.com/pdf/surface_miner_report.pdf.
8. Mattis, A. R. ; Cheskidov, V. I. ; Labutin, V. N. Choice of the hard rock surface mining machinery in Russia // Journal of mining science C/C of fiziko-tekhicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh. 2012. 48, 2; 329–338.
9. Еремин А.М. Особенности оценки потерь при добыче с использованием радиометрической крупнокусковой и порционной сортировки. Доклад на семинаре «Опыт и нововведения в рассмотрении и согласовании проектно-технической документации в ЦКР-ТПИ Роснедр», 22–23 октября 2013 года, Москва, ФГУП «ВИМС». М., 2013.
10. Еремин А.М. Научное обоснование возможности предварительного обогащения золотосульфидных руд и разработка технологии рентгенорадиометрической сортировки: (на при-

- мере месторождения «Кокпатас»): автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: ВНИПИпромтехнологии, 2010. 32 с.
11. Латышев В.Е. Обоснование и разработка эффективных технологий сортировки ядерно-физическими методами золото-содержащих руд на карьерах: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М.: ВНИПИпромтехнологии, 2011. 48 с.
 12. Федянин С.Н. Анализ влияния асимметрии измерений на погрешность радиометрического опробования фосфоритовых руд в автосамосвалах на РКС // Горный Вестник Узбекистана. Научно-технический и производственный журнал. 2001. № 1.
 13. Медников Н.Н., Шеметов П.А., Федянин С.Н. Основные положения формирования технологических схем и грузопотоков руды и вскрыши при эксплуатации фосфоритового карьера // Горный Вестник Узбекистана. Научно-технический и производственный журнал. 2001. № 1.
 14. Иноземцев С.Б., Потапов В.А., Федянин С.Н. Радиометрическая сортировка фосфоритовых руд в автосамосвалах // Горный Вестник Узбекистана. Научно-технический и производственный журнал. 2001. № 1.
 15. Филиппов С.А. Экономическая оценка последствий воздействия на окружающую природную среду на базе уравнений баланса целостных ресурсов, взаимодействующих при разработке месторождений полезных ископаемых. Доклад на семинаре «ОВОС, экологическая экспертиза и государственный экологический контроль при реализации проектов в недропользовании». 24–25 августа 2011 года, Москва, ФГУП «ВИМС». М., 2011.
 16. Медников Н.Н., Сытенков В.Н. Методика расчета производительности роторных экскаваторов и фрезерных комбайнов применительно к технологическим схемам разработки вскрышных пород фосфоритового карьера // Горный Вестник Узбекистана. Научно-технический и производственный журнал. 2001. № 1.

Материал поступил в редакцию 01.02.16.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-1-5-12

SELECTION OF PARAMETERS OF A LAYER-BATCH TECHNOLOGY IN MINING OF COMPLEX-STRUCTURED FIELD DEPOSITS WITH COLD MILLING COMBINED MACHINES

Schwabenland Elena Yegorovna – Head of Sector, Department of Assessment Methodology of Project Documentation on Mining of Solid Minerals, ‘VIMS’, Moscow, Russia. Phone: +7(495)950-34-03. E-mail: schwabenland@vims-geo.ru.

Sokolovsky Alexander Valentinovich – D.Sc. (Eng.), Chairman of the Board of Directors of ‘NTC-Geotechnology’ LLC, Chelyabinsk, Russia. Phone: +7(351)265-55-51. E-mail: avs@ustup.ru.

Pichler Mathias – General Director of Wirtgen International GmbH, Stadt Windhagen, Germany. E-mail: mathias.pichler@wirtgen.de.

Abstract. Ensuring minimum losses and dilution of minerals is one of the most critical tasks in the mining of complex-structured mineral deposits. It is quite challenging to comply with such a requirement when employing conventional technology for mining deposits like these together with preliminary rock loosening with a drill and blast method. In addition, when mining mineral deposits, there occur conditions restricting the use of a drill and blast method to prepare for rock excavation due to environmental conditions or the mine’s location in close proximity with secured facilities. At the same time, industrial enterprises produce milling combined machines able to mine half rocks as well as hard rocks without preparation for excavation. However, theoretical and practical experience of the use of this type of machinery for the development of complex-structured deposits is not enough since the use of conventional technology of a layer-by-layer cold milling of rocks will lead to mixing of different types of ores and stripping soils, which will significantly increase the costs of further raw materials processing. For that reason, the possibility and feasibility of using cold milling combined machines at a promising Oshurkovskoe deposit of apatite ores have been studied as part of the research. It has been proposed to divide run-of-mine ore into batches which form elementary flows with specified quality characteristics. An X-ray radiometric method was used for quality control of rock mass mined at the Oshurkovskoe deposit; and a place to install the device on a cold milling machine was determined. The research results have demonstrated the expediency of the use of this method in mining at the Oshurkovskoe field.

Keywords: Cold milling combined machine, complex-structured deposit, quality, losses, dilution, open pit mining.

References

1. Schwabenland E.Ye. O potentsiale frezernykh kombainov nepre-ryvnogo deistvia pri razrabotke mestorozhdenii otkrytym sposobom [Potential of milling continuous miners in open-pit mining]. *Ratsionalnoe osvoenie nedr* [Sustainable development of mineral resources]. 2014, no. 1.
2. Grabsky A.A. Sovremennoe sostoianie i perspektivy razvitiia konstruktssii kariernykh kombainov [State-of-the-art and development prospects of a surface miner design]. *Gornaiia Promyshlennost* [Mining Industry]. 2010, no. 4 (92), pp. 60–62.
3. Grabsky A.A. *Tekhnicheskaya proizvoditelnost kariernogo kombaina* [Technical performance of surface miners]. *Gornyi informatsionno-analitichesky byulleten (nauchno-tekhnicheskyy zhurnal)* [Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)]. 2010, no. 10, pp. 206–210.
4. Zaitsev G.D., Cheskidov V.I. Otseuka tekhnologicheskikh i tekhnicheskikh vozmozhnostei oborudovaniia dlia bezvzryvnoi dobychi poleznykh iskopaemykh [Evaluation of technological and technical capabilities of blastfree mining equipment]. *Gornyi informatsionno-analitichesky byulleten (nauchno-tekhnicheskyy zhurnal)* [Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)]. 2006, no. 2, pp. 222–227.
5. Burnistrov K.V., Kolonyuk A. A., Arguimbaev K.R. Vybora kompleksov oborudovaniia dlia proizvodstva vyemochno-pogruzochnykh rabot v stesniionnykh usloviakh nizhnikh gorizontov karirov [Selection of complexes of extraction-and-loading equipment in a confined area of subsurface pits]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2010, no. 1 (29), pp. 22–25.
6. Pichler M., Pankiewicz B.U., Pankiewicz M.B. Tekhnologii Wirtgen Surface Mining v gornodobyvayushchei promyshlennosti [Wirtgen Surface Mining technologies in the mining industry]. *Osnovnye sredstva* [Fixed assets]. 2011, no. 1, pp. 58–64.

7. Final report on the applicability of a surface miner in a nongrai limestone mine at the Lafarge Umiam Mining Pvt. Ltd in Meghalaya, India / Achyuta Krishna Ghosh, Dr/ Sujit Kumar Mondal, Santosh Kumar Singh, Dr. Amalendu Sinha : technical information brochures. – Central Institute of Mining & Fuel Research [Council of Scientific and Industrial Research] Department of Science & Technology, Government of India. July, 2010. http://lumpl.com/pdf/surface_miner_report.pdf.
8. Mattis, A.R.; Cheskidov, V.I.; Labutin, V.N. Choice of hard rock surface mining machinery in Russia. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh* [Journal of mining science]. 2012. no. 2(48), pp. 329–338.
9. Eryomin A.M. Osobennosti otsenki poter pri dobyche s ispolzovaniem radiometricheskoi krupnokuskovoi i portionnoi sortirovki [Specifics of evaluation of losses in mining using radiometric lump and batch sorting]. *Doklad na seminare «Opyt i novovvedeniya v rassmotrenii i soglasovanii proektno-tekhnicheskoi dokumentatsii v TsKR-TPI Rosnedr»* [Report at the seminar 'Experience and innovations in the review and approval of technical documentation in the Central Committee for solid mineral deposits development of Rosnedra'], 22–23 October 2013, Moscow, 'VIMS' Federal State Unitary Enterprise.
10. Eryomin A.M. *Nauchnoe obosnovanie vozmozhnosti predvaritelnogo obogashcheniya zolotosulfidnykh rud i razrabotka tekhnologii rentgenoradiometricheskoi sortirovki: (na primere mestorozhdeniya «Kokpatas»)* [Scientific substantiation of the possibility of preliminary enrichment of gold sulfide ores and development of an X-ray radiometric sorting technology (a study of Kokpatas deposit). Extended abstract of Ph.D. dissertation]. Moscow, 2010, 32 p.
11. Latyshev V.E. *Obosnovanie i razrabotka effektivnykh tekhnologiy sortirovki yadernofizicheskimi metodami zolotosoderzhashchikh rud na karierakh* [Substantiation and development of effective technologies of gold-bearing ores sorting with nuclear-physical methods in open pits. Extended abstract of D.Sc. dissertation]. Moscow, 2011, 48 p.
12. Fedyanin S.N. Analiz vliyaniya asimmetrii izmereniy na pogreshnost radiometricheskogo opytirovaniya fosforitovykh rud v avtosamosvalakh na RKS [Analysis of the impact of measurements asymmetry on the accuracy of radiometric assay of phosphorite ores in dump trucks at the NCC]. *Gorny Vestnik Uzbekistana. Nauchno-tekhnicheskyy i proizvodstvennyy zhurnal* [Mining Bulletin of Uzbekistan. Scientific-technical and industrial journal], 2001, no. 1.
13. Mednikov N.N., Chemetov P.A., Fedyanin S.N. Osnovnye polozheniya formirovaniya tekhnologicheskikh skhem i gruzopotokov rudy i vskryshi pri ekspluatatsii fosforitovogo kariera [Main provisions of the development of process flow charts and traffic of ore and overburden in operating a phosphorite mine]. *Gorny Vestnik Uzbekistana. Nauchno-tekhnicheskyy i proizvodstvennyy zhurnal* [Mining Bulletin of Uzbekistan. Scientific-technical and industrial journal], 2001, no. 1.
14. Inozemtsev S.B., Potapov V.A., Fedyanin S.N. Radiometricheskaya sortirovka fosforitovykh rud v avtosamosvalakh [Radiometric sorting of phosphorite ores in dump trucks]. *Gorny Vestnik Uzbekistana. Nauchno-tekhnicheskyy i proizvodstvennyy zhurnal* [Mining Bulletin of Uzbekistan. Scientific-technical and industrial journal], 2001, no. 1.
15. Filippov S.A. *Ekonomicheskaya otsenka posledstviy vozdeystviya na okruzhayushchuyu prirodnuyu sredu na baze uravneniy balansa tselostnykh resursov, vzaimodeystviyushchikh pri razrabotke mestorozhdeniy poleznykh iskopayemykh* [Economic evaluation of the consequences of environmental impacts on the basis of balance equations of integral resources interacting at the development of minerals deposits]. *Doklad na seminare «OVOS, ekologicheskaya ekspertiza i gosudarstvennyy ekologicheskyy kontrol pri realizatsii proektov v nedropolzovanii»* [Report at the seminar EIA, environmental impact assessment and state environmental control in the implementation of projects in subsurface resource management]. August 24–25, 2011, Moscow, 'VIMS' Federal State Unitary Enterprise.
16. Mednikov N.N., Sytenkov V.N. Metodika raschyota proizvoditelnosti rotornykh ekskavatorov i frezernykh kombainov primenitelno k tekhnologicheskim skhemam razrabotki vskryshnykh porod fosforitovogo kariera [Calculation methodology of the capacity of bucket wheel excavators and milling machines with regard to process flow charts of the development of phosphorite deposits]. *Gorny Vestnik Uzbekistana. Nauchno-tekhnicheskyy i proizvodstvennyy zhurnal* [Mining Bulletin of Uzbekistan. Scientific-technical and industrial journal], 2001, no. 1.

Швабенланд Е.Е., Соколовский А.В., Пихлер М. Выбор параметров послойно-порционной технологии при разработке сложноструктурных месторождений комбайнами фрезерного типа // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14. №1. С. 5–12. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-1-5-12

Schwabenland E.Ye., Sokolovsky A.V., Pichler M. Selection of parameters of a layer-batch technology in mining of complex-structured field deposits with cold milling combined machines. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 1, pp. 5–12. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-1-5-12

УДК 669.337

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-1-12-17

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ ТЕРМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ГРАНУЛИРОВАННОГО ЧЕРНОВОГО МЕДНОГО СУЛЬФИДНОГО КОНЦЕНТРАТА ЗАБАЛАНСОВОЙ РУДЫ

Каримова Л.М.¹, Кайралапов Е.Т.¹, Бухарицин В.О.²

¹ ТОО «Инновация», Караганда, Казахстан

² Химико-металлургический институт им. Ж. Абишева, Караганда, Казахстан

Аннотация. Цель работы состояла в определении возможности использования тепла химических реакций при обжиге некондиционных медных концентратов.

Методом дифференциально-термического анализа проведены исследования окислительного обжига гранулированного черного медного сульфидного концентрата. Дериватограммы гранул имеют два ярко выраженных термических эффекта. Первый, эндотермический эффект, соответствует удалению физической влаги.

© Каримова Л.М., Кайралапов Е.Т., Бухарицин В.О., 2016

Второй пик экзотермический, обусловленный окислением сульфидной минеральной составляющей медного концентрата. Рассчитана величина кажущейся энергии активации 166,280 кДж/моль, которая свидетельствует о лимитировании процесса кинетическим режимом сульфатизации сульфидов меди. Величина кажущейся энергии активации удаления влаги составила 27,713 кДж/моль и соответствует лимитированию процесса внутренней диффузией.

Оценкой тепловых характеристик обжигового процесса установлено, что при содержании меди в сульфидном концентрате около 10% затраты тепла на сушку могут быть практически полностью компенсированы, а при сульфатизирующем обжиге гарантируется полное использование тепла химических реакций для технологического процесса, что может быть учтено для разработки оптимального режима управления процессом обжига.

Ключевые слова: гранулы, дериватограммы, скорость нагревания, графическая зависимость.

Введение

В работах [1–3] проведена оптимизация процесса сульфатизирующего обжига в лабораторной шахтной печи малосернистого чернового медного флотоконцентрата с использованием влияния различных факторов на последующее сернокислотное выщелачивание. Помимо определяющего влияния расхода воздуха не менее важным является недопущение спекания материала, которое происходит выше 650°C [4].

Одним из методов исследования процессов, последовательно протекающих при повышении температуры, получивших широкое распространение, является метод термического анализа.

Для изучения процессов, протекающих при нагреве чернового медного концентрата, необходимо знание кинетических параметров, в частности значений кажущейся энергии активации.

Материалы и результаты исследований

Проведен дифференциально-термический анализ гранул чернового медного концентрата с использованием дериватографа Derivatograf Q-1000 фирмы «МОН» системы F. Paulik, J. Paulik, L. Erdely.

Концентрат окатывали в грануляторе, имеющем чашу диаметром 0,4 м с подачей разбрызгиванием технической воды. Специального связующего (лигносульфонатов) не добавляли для выявления кинетических параметров без влияния тормозящих процесс окисления веществ, к тому же горючих. Фракции гранул необходимого размера отсеивали на ситах. Исследуемый концентрат, полученный путем переработки (методом флотации) забалансовой медной сульфидной руды Жезказганского месторождения (Карагандинская область, Казахстан), с содержанием класса 74 мкм 70,4% имел насыпную массу 1,33 г/см³. Химический состав концентрата представлен в **табл. 1**. Фазовый и минеральный составы чернового концентрата – в **табл. 2, 3**.

Таблица 1

Содержание основных компонентов в черновом концентрате

Компоненты	Содержание, %	Компоненты	Содержание, %
Cu	4,73	SiO ₂	60,68
Ag, г/т	87,2	Zn	0,75
Fe	5,46	K ₂ O	1,20
Mg	1,16	Al ₂ O ₃	8,64
S	2,97	Ti	0,4
Na ₂ O	1,63	Pb	0,548

Таблица 2

Результаты фазового анализа чернового концентрата на содержание форм меди, %

Компоненты	абс.	отн.
Сульфаты	<0,2(<0,01)	
Карбонаты	<0,2(0,09)	2,3
Оксиды, силикаты	<0,2	
Вторичных сульфидов (ковеллин, халькозин, борнит)	4,1	86,68
Халькопирит	0,63	13,32
Суммарно	4,73	100,0

Таблица 3

Минеральный состав сульфидного концентрата, %

CuFeS ₂ (халькопирит)	Cu ₅ FeS ₄ (борнит)	Cu ₂ S (халькозин)
1,87	1,58	3,70

Для исследований использовали окатыши – 2+3 мм с влажностью 8%. Навеску гранул средней массой 1437 мг помещали в кварцевую ячейку с отверстиями для свободного непринудительного прохождения воздуха, скорость нагревания изменяли от 5 до 20°C/мин.

Дериватограммы чернового медного концентрата имеют два ярко выраженных термических эффекта (**рис. 1**).

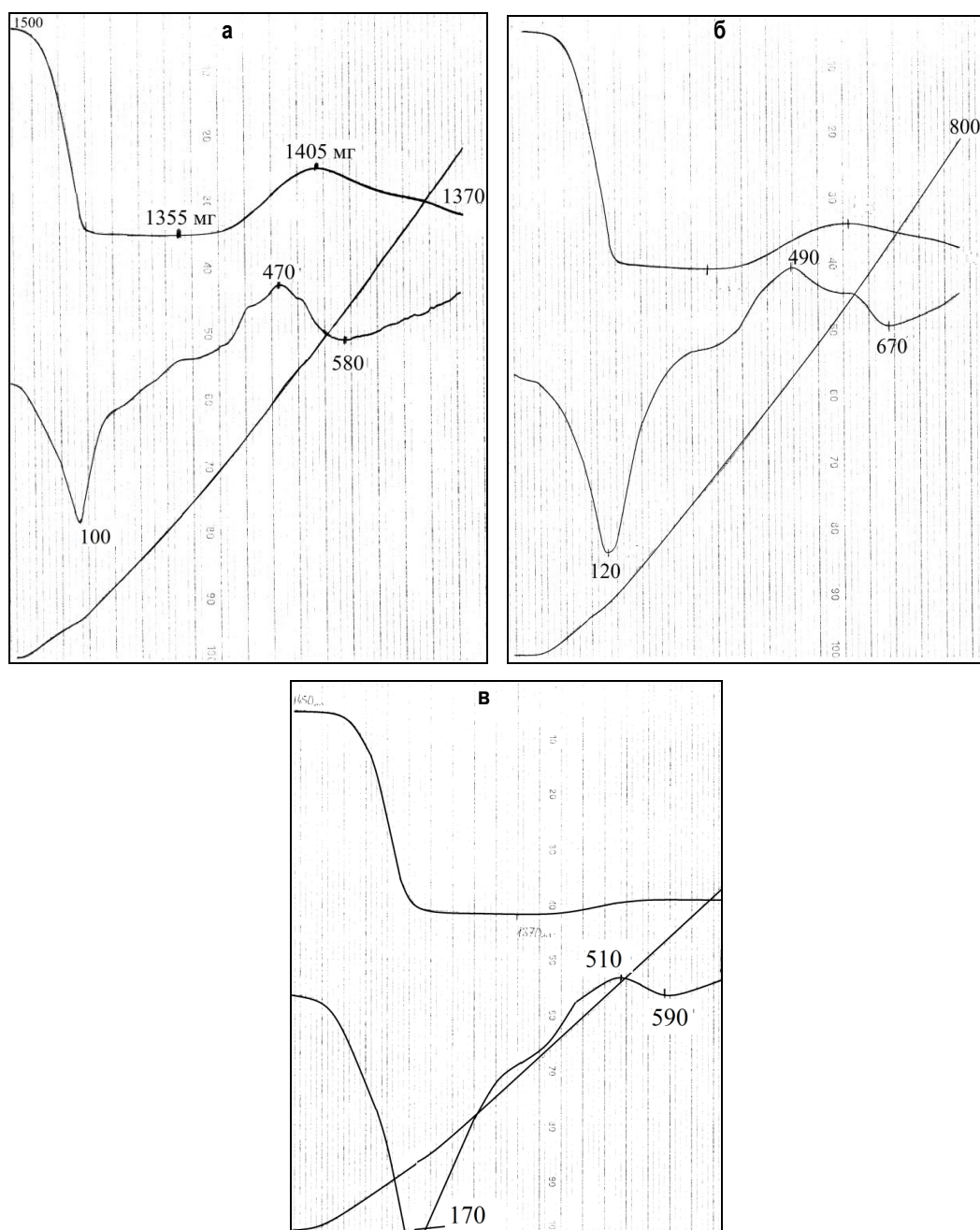


Рис. 1. Дериватограммы гранул (+2–3 мм) черного концентрата при скорости нагрева 5 (а), 10 (б) и 20 (в) град/мин

Первый, эндотермический эффект, соответствует удалению физической влаги, что сопровождается уменьшением массы навески. При дальнейшем нагреве наблюдается второй пик, экзотермический, обусловленный окислением сульфидной минеральной составляющей медного концентрата с значительным увеличением массы навески. При скорости нагрева 5 град/мин температура пика экзотермического эффекта составила 470°C, при 10 град/мин – 490°C, при 20 град/мин – 510°C.

Полученные данные были использованы

для определения энергии активации процесса по методу [5]

$$\frac{1}{T_m} = A - \frac{R}{E} \ln v, \quad (1)$$

где T_m – температура максимума, К; A – константа, К⁻¹; R – газовая постоянная, Дж/(моль · К); E – энергия активации процесса, Дж/моль; v – скорость нагрева, К/с.

Результаты расчета приведены в табл. 4.

Таблица 4

Исходные данные для расчета энергии активации на основе формулы (1) для экзоэффекта сульфатизации

$T_{\max}, ^\circ\text{C}$	$1/T_{\max}, \text{K}^{-1}$	ν		$\ln \nu$
		$^\circ\text{C}/\text{мин}$	$\text{K}/\text{с}$	
470	$1,346 \cdot 10^{-3}$	5	0,08333	-2,4849
490	$1,311 \cdot 10^{-3}$	10	0,1666	-1,7917
510	$1,277 \cdot 10^{-3}$	20	0,3333	-1,0986

Построение этих данных в координатах $1/T_{\max} - \ln \nu$ позволило выявить их линейное расположение (рис. 2) и возможность обработки на уравнение прямой методом наименьших квадратов, при $y=1/T_{\max}$, $x=\ln \nu$, $c=A$, $a=-R/E$. Значимость частных зависимостей определяли по коэффициенту нелинейной множественной корреляции R и его значимости [6, 7] t_R , которая составила $R = 0,9999$.

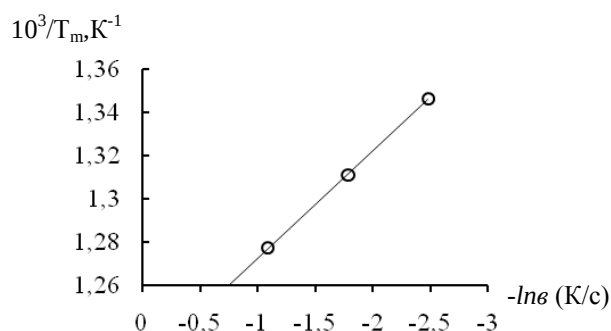


Рис. 2. Линеаризованная зависимость по формуле (1): T_m – температура максимума; ν – скорость нагревания навески

При этом получена величина кажущейся энергии активации $E = 166280 \text{ Дж/моль} = 166,280 \text{ кДж/моль}$, которая свидетельствует о лимитировании процесса кинетическим режимом сульфатизации сульфидов меди и в общем случае определяется энергией разрыва химических связей [8]. Окисление гранул CuS_2 в составе гранул малого размера протекает в кинетической области, т.к. вещество гранулы в этом случае не оказывает существенного диффузионного сопротивления. Процесс определяется скоростью химической реакции (осуществляется кинетический режим).

Поскольку удаление влаги и в технологическом процессе обжига медных концентратов предшествует возгоранию гранул, целесообразно обработать данные ДТА и по эндотермическому эффекту. Результаты этой обработки представлены в табл. 5 и на рис. 3.

Таблица 5

Исходные данные по сушке гранул для расчета энергии активации на основе формулы (1) для эндоэффекта испарения влаги

$T, ^\circ\text{C}$	$1/T, \text{K}^{-1}$	ν		$\ln \nu$
		$^\circ\text{C}/\text{мин}$	$\text{K}/\text{с}$	
100	$2,681 \cdot 10^{-3}$	5	0,08333	-2,4849
120	$2,545 \cdot 10^{-3}$	10	0,1666	-1,7917
170	$2,257 \cdot 10^{-3}$	20	0,3333	-1,0986

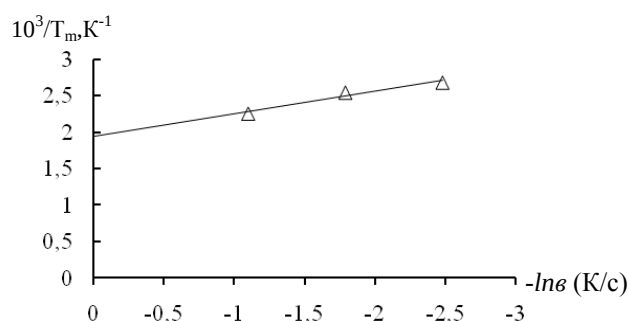


Рис. 3. Линеаризованная зависимость по формуле (1): T_m – экстремальная температура эндоэффекта; ν – скорость нагревания навески

Обработка данных табл. 5 методом наименьших квадратов позволила получить прямолинейную зависимость с коэффициентом нелинейной множественной корреляции $R = 0,9589$, $t_R = 12,0 > 2$. Поэтому ее можно использовать для определения величины энергии активации влаги, которая составила $E = 27713 \text{ Дж/моль} = 27,713 \text{ кДж/моль}$. Эта величина соответствует лимитированию процесса внутренней диффузией, что в данном случае соответствует сопротивлению процесса удаления влаги из гранул с формированием внутренней пористой структуры. Благодаря этому и обеспечивается последующий кинетический режим окислительной сульфатизации мелких гранул.

Помимо этого можно оценить и тепловые характеристики обжигового процесса методом сравнения площадей пиков для известного и неизвестных тепловых эффектов [9]. Поскольку на диаграммной бумаге нанесена сотка, образующая квадраты достаточно малого размера, площадь пиков может быть вычислена по сумме квадратов, вместились в площадь пика.

Так, для эндоэффекта число таких квадратов составило 270, а для экзоэффекта – 123. Соотношение этих сумм для экзо- и эндоэффекта составило $k=123/270 = 0,456$. Эта величина, с одной стороны, характеризует энергетическое отличие этих эффектов, а с другой – создает возможность определить удельное количество выделяющегося тепла химических реакций, приходящееся на единицу массы меди. Это позволит оценить и степень автогенности процесса обжига.

Теплота испарения воды равна 40,657 кДж/моль [10], или 2,259 кДж/г. При снятии термограммы со скоростью 10 град/мин использовались навеска гранул 1,35 г с содержанием влаги 8%, или 0,108 г H₂O. Отсюда тепловой эффект испарения воды на термограмме соответствует величине $2,259 \cdot 0,108 = 0,244$ кДж/навеска. По соотношению площадей пиков для экзо- и эндотермических эффектов находим величину теплового эффекта, относящуюся к окислительной сульфатизации навески и равную $0,244$ кДж/навеска $\cdot 0,456 = 0,111$ кДж/навеска.

В пересчете на содержание меди в навеске 4,73% тепловой эффект составит $0,111/0,0473 = 2,35$ кДж/г Cu. Этот показатель может быть использован в технологических целях с соответствующим пересчетом на тонну меди в концентрате $2,35 \cdot 10^6$ кДж/т Cu.

Полученные данные позволяют утверждать, что в процессе сульфатирующего обжига использованного чернового концентрата выделяющееся тепло химических реакций сульфатизации может примерно наполовину компенсировать затраты на удаление влаги. Это зависит от содержания сульфидов, и эта компенсация может увеличиваться пропорционально содержанию меди при средней влажности гранулированного материала на уровне 8% (табл. 6).

Таблица 6
Количество выделяющегося при сульфатизации тепла в расчете на тонну меди в зависимости от содержания меди в концентрате

Содержание меди, %	4,73	5	6	7	8	9	10	11	12
Выделение тепла, 10 ⁶ кДж/т Cu	2,35	2,48	2,98	3,48	3,98	4,47	4,97	5,46	5,96
Степень компенсации затрат тепла на сушку, %	45,6	48,2	57,8	67,5	77,1	86,8	96,4	106	116

Таким образом, при содержании меди в сульфидном концентрате около 10% затраты тепла на сушку могут быть практически полностью компенсированы, а в общем случае переработка черновых медных концентратов с операцией сульфатирующего обжига гарантирует полное использование тепла химических реакций для технологического процесса (не требуется отвод избыточного тепла).

Выводы

1. Методом дифференциально-термического анализа проведены исследования гранул чернового медного сульфидного концентрата крупно-

стью $-2+3$ мм с влажностью 8% при скорости нагревания от 5 до 20°C/мин.

2. Дериватограммы гранул чернового медного сульфидного концентрата имеют два ярко выраженных термических эффекта. Первый, эндотермический эффект, соответствует удалению физической влаги, что сопровождается уменьшением массы навески пробы. Второй пик экзотермический, обусловленный окислением сульфидной минеральной составляющей медного концентрата.

3. Получена величина кажущейся энергии активации 166,280 кДж/моль, которая свидетельствует о лимитировании процесса кинетическим режимом сульфатизации сульфидов меди. Величина кажущейся энергии активации влаги составила 27,713 кДж/моль, которая соответствует лимитированию процесса внутренней диффузией.

4. Проведена оценка тепловых характеристик обжигового процесса методом сравнения площадей пиков тепловых эффектов. Установлено, что при содержании меди в сульфидном концентрате около 10% затраты тепла на сушку могут быть практически полностью компенсированы, а в общем случае переработка черновых медных концентратов с операцией сульфатирующего обжига гарантирует полное использование тепла химических реакций для технологического процесса (не требуется отвод избыточного тепла).

Список литературы

1. Оптимизация процесса обжига некондиционных медных сульфидных концентратов / Каримова Л.М., Жумашев К.Ж., Малышев В.П., Кайралапов Е.Т. // КИМС. 2011. №2(275). С. 56–67.
2. Каримова Л.М. Сульфатирующий обжиг чернового медно-сульфидного концентрата для серно-кислотного выщелачивания // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. №3(47). С. 15–21.
3. Саргсян Л.Е., Оганесян А.М. Обжиг сульфидно-цинкового концентрата с получением преимущественно сульфатного огарка для эффективного выщелачивания // Цветные металлы. 2006. №7. С. 16.
4. Смирнов В.И., Тихонов А.И. Обжиг медных руд и концентратов. Свердловск: Metallurgizdat, 1958. 280 с.
5. Букетов Е.А., Малышев В.П. Технологические процессы шахтного обжига в цветной металлургии. Алма-Ата: Наука КазССР, 1973. 350 с.
6. Дукарский О.М., Закурдаев А.Г. Статистический анализ и обработка данных на ЭВМ «Минск-22». М.: Статистика, 1971. 179 с.
7. Сисыков В.И. Корреляционный анализ в экономических исследованиях. М.: Статистика, 1975. 168 с.
8. Эммануэль Н.М., Кнорре Д.Г. Курс химической кинетики. М.: Высш. шк., 1974. 400 с.
9. Берг Л.Г. Введение в термографию. 2-е изд., доп. М.: Наука, 1969. 396 с.
10. Волков А.И., Жарский И.М. Большой химический справочник. Мн.: Современная школа, 2005. 608 с.

Материал поступил в редакцию 11.01.16.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-1-12-17

DIFFERENTIAL THERMAL ANALYSIS OF THE PELLETED ROUGH COPPER SULPHIDE CONCENTRATE OF OFF-BALANCE ORE

Karimova Lyutsiya Monirovna – Ph.D. (Chemical), leading research fellow, Innovatsia Limited Partnership, Karaganda, Kazakhstan. E-mail: lutsia.08@mail.ru.

Kairalapov Yerlan Tokpaevich – Ph.D. (Eng.), senior research fellow, Innovatsia Limited Partnership, Karaganda, Kazakhstan. E-mail: kairalapov.e@mail.ru.

Bukharitsin Valentin Olegovich – senior research fellow, Chemical and Metallurgical Institute named after Zh. Abishev, Karaganda, Kazakhstan.

Abstract. The purpose of this work was to determine the possibility of using chemical reaction heat when roasting substandard copper concentrates.

Dead roasting of rough pellets of copper sulphide concentrate has been studied through differential thermal analysis. The thermograms of the pellets have two distinct thermal effects. The first effect – endothermic – corresponds to the physical removal of moisture. The second peak – exothermic – is due to oxidation of the sulfide mineral component of copper concentrate. We have obtained the apparent activation energy value of 166.280 kJ·mol which indicates limitation of the process by kinetic copper sulfide sulphatization. The apparent activation energy value was moisture 27.713 kJ·mol. The value corresponds to limitation of the internal diffusion process.

With evaluation of the thermal performance of the calcined process, it has been established that drying heat losses can be almost completely compensated when the copper content in sulfidic concentrate amounts to about 10%, while sulphatizing roasting ensures the complete use of chemical reaction heat for the process, which can be considered at developing an optimal roasting control condition.

Keywords: Pellets, derivatograms, heating rate, characteristic curve.

References

1. Karimova L.M., Zhumashev K.Zh., Malyshev V.P., Kayralapov Y.T. Optimization of roasting off-grade copper sulfide concentrates. *KIMS*, 2011, №2 (275), pp. 56–67.
2. Karimova L.M. Sulphatizing roasting of rough copper sulfide concentrates for sulfuric acid leaching. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2014, №3 (47), pp.15–21.
3. Sargsyan L.E., Oganessian A.M. Roasting of sulfide zinc concentrate producing mainly roasted sulfate products for efficient leaching. *Tsvetnye metally* [Non-ferrous metals]. 2006, №7, p. 16.
4. Smirnov V.I., Tikhonov A.I. *Obzhig mednykh rud i koncentratov* [Roasting of copper ores and concentrates]. Sverdlovsk, Metallurgizdat, 1958. 280 p.
5. Buketov E.A., Malyshev V.P. *Tekhnologicheskie protsessy shakhtnogo obzhiga v tsvetnoy metallurgii* [Shaft roasting processes in non-ferrous metallurgy]. Almaty, Nauka KazSSR, 1973. 350 p.
6. Dukarsky O.M., Zakurdaev A.G. *Statisticheskij analiz i obrabotka dannykh na EHM «Minsk-22»* [Statistical analysis and data processing with "Minsk-22" electronic computing machine]. Moscow: Statistika, 1971. 179 p.
7. Siskov V.I. *Korrelatsionnyj analiz v ekonomicheskikh issledovaniyakh* [Correlation analysis in economic research]. Moscow: Statistika, 1975. 168 p.
8. Emmanuel N.M., Knorre D.G. *Kurs khimicheskoy kinetiki* [Course on chemical kinetics]. Moscow, Vysshaya Shkola, 1974. 400 p.
9. Berg L.G. *Vvedenie v termografiyu* [Introduction to thermography]. Moscow: Nauka, 1969. 396 p.
10. Volkov A.I., Zharsky I.M. *Bol'shoj khimicheskij spravochnik* [Large Handbook of Chemistry]. Minsk: Modern School, 2005. 608 p.

Каримова Л.М., Кайрапапов Е.Т., Бухарицин В.О. // Дифференциальный термический анализ гранулированного черного медного сульфидного концентрата забалансовой руды. Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14. №1. С. 12–17. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-1-12-17

Karimova L.M., Kairalapov Ye.T., Bukharitsin V.O. Differential thermal analysis of the pelleted rough copper sulphide concentrate of off-balance ore. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 1, pp. 12–17. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-1-12-17

ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ И УТИЛИЗАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ И ОТХОДОВ

УДК 622.765:542.65

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-1-18-26

УДАЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ ИЗ РАСТВОРОВ МЕТОДОМ ИОННОЙ ФЛОТАЦИИ

Медяник Н.Л.¹, Тусупбаев Н.К.², Варламова И.А.¹, Гиревая Х.Я.¹, Калугина Н.Л.¹¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия² АО «Центр наук о Земле, металлургии и обогащения», Алматы, Казахстан

Аннотация. В статье приведен обзор последних научных исследований в области извлечения тяжелых металлов из растворов методом ионной флотации.

Целью выполненного исследования является анализ современных тенденций в развитии теории и практики ионной флотации как основы чистых технологий переработки техногенных вод. Определены основные тенденции в развитии метода ионной флотации применительно к техногенным растворам: подбор условий, повышающих эффективность процесса до максимально возможного извлечения металлов; минимальный расход реагентов с возможностью их регенерации и получением максимально очищенной воды; оценка свойств реагентов-собираателей, структуры образующихся комплексов «металл-реагент», механизма комплексообразования; синтез и моделирование эффективных реагентов-собираателей, особенно с применением перспективных квантово-химических методов. Отмечено, что в квантовой химии флотореагентов в настоящее время широкое применение находят расчеты молекулярных электрических моментов, поляризуемостей, степени переноса заряда, абсолютной жесткости, химического потенциала по Пирсону и Парру, энергии комплексообразования, количества внутримолекулярных водородных связей, определяющие возможность применения реагентов в процессах флотации на основе наиболее энергетически выгодных и конформационно устойчивых извлекаемых структур. Разработаны теоретические основы моделирования пространственной структуры и малых, и крупных молекул, а также построения зависимостей их активности от пространственной структуры. Установлено соотношение экспериментальных данных с результатами квантово-химических расчетов. Результаты флотационных опытов подтвердили преимущества реагентов, подобранных на основании квантово-химических расчетов. Проведение интенсивных исследований в соответствии с вышеуказанными трендами привело к тому, что в настоящее время на основе метода ионной флотации создаются фактически экологически чистые технологии переработки техногенных вод.

Ключевые слова: тяжелые металлы, техногенные воды, ионная флотация, реагенты-собираатели, квантово-химические методы.

Введение

Загрязнение окружающей среды, главным образом водных систем, является одной из самых значимых экологических проблем настоящего времени. Многочисленные потоки техногенных вод содержат тяжелые металлы, которые сочетают высокую токсичность с устойчивостью в окружающей среде. Вот почему удаление тяжелых металлов из различных типов промышленных вод является актуальной задачей, что подтверждают многочисленные исследования в этой области, выполняемые в последнее время. Для разделения и удаления тяжелых металлов предлагаются такие методы, как электрохимическая об-

работка, ионный обмен, осаждение, разделение методами адсорбции, экстракции, ультрафильтрации [13, 15, 17, 22, 23, 33, 35, 43, 45, 46].

Все более значимыми для удаления тяжелых металлов из техногенных вод становятся адсорбционные методы разделения. Классификация этих методов приведена в работе [9]. Авторы особо выделяют две категории методов, использующих адсорбцию на газовых пузырьках: разделение с отделением пены и беспенное разделение.

В последние годы резко возросло число работ в области такого беспенного способа извлечения тяжелых металлов из техногенных растворов, как ионная флотация. Несомненными преимуществами ионной флотации являются: простота и эффективность, низкие энергетические потребности, низкая остаточная концентрация металлов, высо-

© Медяник Н.Л., Тусупбаев Н.К., Варламова И.А., Гиревая Х.Я., Калугина Н.Л., 2016

кая скорость процесса, небольшие размеры аппаратов, гибкость в применении метода к различным металлам на различных уровнях, производство небольшого объема осадка [9, 14, 19].

Целью выполненного исследования является анализ современных тенденций в развитии теории и практики ионной флотации как основы чистых технологий переработки техногенных вод.

Теория и методы исследования

Процесс ионной флотации зависит от многих физических и химических факторов, таких как тип и концентрация пенообразователя и собирателя, время флотации, ионная сила обрабатываемых растворов и природа ионов извлекаемых металлов. Поскольку эти факторы взаимосвязаны, контролируя процесс ионной флотации, довольно трудно найти их оптимальное соотношение. Вот почему важной тенденцией в исследованиях по ионной флотации является подбор условий, повышающих эффективность проведения процесса до максимально возможного извлечения металлов, с минимальным расходом реагентов, получением воды, очищенной до норм для рыбохозяйственных водоемов.

Так, в работах Б.С. Ксенофонта с соавторами [16, 26, 27] рассмотрены вопросы моделирования флотационной очистки сточных вод от ионов металлов и взвешенных веществ с гидрофобной и гидрофильно-гидрофобной поверхностью. Подробно описаны и рассчитаны процессы многостадийной модели ионной флотации, рассмотрен частный случай выпадения ионов из пенного слоя. Показано, что для более полного извлечения ионов металлов из сточных вод целесообразно использовать в качестве собирателя биомассу микроорганизмов или продукты ее переработки.

Оптимальные условия флотации ионов редкоземельных металлов анионогенным поверхностно-активным веществом – оксифосом Б – определены в работе [28]. Условия удаления ионов кадмия методом ионной флотации из модельных растворов промышленных сточных вод с использованием как реагент-собирателя додецилсульфата натрия, а как пенообразователя этанола, установили Salmani M. с сотрудниками [9]: эффективность удаления 84% достигается при отношении собиратель:металл, равном 3:1, при проведении флотации в течение 60 мин со скоростью 50 мл/мин; максимальное удаление кадмия (92,1%) наблюдалось при введении этанола в концентрации 0,4% перед началом флотации.

В исследовании [29] найдены условия количественного извлечения гидроксидов кобальта из

аммиачных растворов и гидроксидов кадмия, кобальта, никеля из растворов гидроксида натрия. В работе [36] установлены оптимальные условия проведения флотации тория (IV) и урана (VI) из разбавленных сульфатных растворов, при которых соединения тория (IV) извлекаются на 93%, а соединения урана (VI) – на 97%. Предложен механизм взаимодействия соединений урана (VI) и тория (IV) с реагентом «Азол 1019, марка В».

Разрабатывая простой, быстрый и экономичный метод извлечения меди (II) и свинца (II), Ghazy S. E. с соавторами [3] использовали ионную флотацию, в основе которой – образование комплекса между ионами меди (II), свинца (II) и дифенилкарбазоном с последующей флотацией с олеиновой кислотой как поверхностно-активным веществом. Метод был успешно применен для извлечения почти всей меди (II) и свинца (II) из некоторых природных вод при pH 6 и 7 при комнатной температуре (~25°C).

Экспериментальные результаты, полученные в исследовании [8], показали возможность извлечения 97% серебра при использовании изопропилксантогената натрия как пенообразователя в количестве 0,06 и 0,04 г/л. Установлено, что изменение концентрации ксантогената не влияет существенно на извлечение серебра.

В работе [10] исследовано влияние многих параметров на скорость и процесс флотации. Показано, что на скорость и эффективность флотации комплексов «кобальт (II)-ЭДТА» заметно влияют скорость воздушного потока, концентрация хлорида цетилпиридиния (CPrCl), применяемого как реагента-собирателя, и ионная сила раствора. Остальные параметры (концентрации кобальта, ЭДТА и этанола) не имели никакого влияния на степень извлечения комплексов, но существенно влияли на скорость флотации. При оптимальных условиях (соотношение количества кобальт (II) и ЭДТА равно 1:1; соотношение количества CPrCl:кобальт (II) – 4:1; pH 7,8) степень извлечения кобальта достигает 99%. Для анализа экспериментальных данных использовали классические кинетические модели первого и второго порядка.

Другая важная тенденция в современных исследованиях в области ионной флотации – оценка свойств реагентов-собирателей, структуры образующихся комплексов «металл-реагент», механизма комплексообразования с целью подбора или синтеза реагентов-собирателей для проведения эффективной ионной флотации [37, 38]. Некоторые из предлагаемых в настоящее время реагентов для извлечения тяжелых металлов из различных растворов методом ионной флотации приведены в **таблице**.

**Реагенты для извлечения тяжелых металлов
из растворов методом ионной флотации**

Извлекаемый металл	Тип перерабатываемого раствора	Реагент	Литературный источник
Кадмий (II)	Модельные растворы промышленных сточных вод	Додецилсульфат натрия и этанол как пенообразователь	[9]
Кобальт (II)	Аммиачные растворы кобальтсодержащих стоков объединения «Сибур-Химпром»	Неионогенный ПАВ Синтаид-5	[25]
Уран (VI), торий (IV)	Разбавленные сульфатные растворы	Реагент Азол 1019, марка В	[31]
Медь (II), кобальт (II), никель (II)	Аммиачные растворы	N-(2-гидроксиэтил) алкиламины	[41]
Медь (II) и кобальт (II)	Щелочные растворы	Гидразоны ацетона	[40]
Медь (II), цинк	Кислые техногенные воды горных предприятий	Комплексный реагент РОЛ: смесь сложных эфиров терефталевой кислоты	[29]
Медь (II), цинк	Кислые техногенные воды горных предприятий	Продукты деструкции полиэтиленгликольтерефталата в глицерине	[7]
Медь (II), свинец (II)	Природные воды	Дифенилкарбазон с олеиновой кислотой как поверхностно-активным веществом	[3]
Серебро	Отработанные разбавленные растворы фиксаторов	Ксантогенат, пенообразователь – изопропилксантогенат	[8]
Комплексы «кобальт (II)-ЭДТА»	Водные растворы	Хлорид цетилпиридиния	[10]

Свойства реагентов-собирателей, структура комплексов «металл-реагент», механизм комплексообразования рассмотрены в следующих работах.

В работе [25] исследовано влияние на результаты концентрирования ионов меди (II), кобальта (II), никеля (II) из аммиачных растворов N-(2-гидроксиэтил)алкиламинами длины радикала реагента.

Л. Г.Чекановой с сотрудниками [18] изучены физико-химические свойства (растворимость, кислотно-основные свойства, константы равновесия, устойчивость к щелочному гидролизу) бензоил-, нонаноил-, ундеканойлгидразонов аце-

тона, определяющие возможность применения этих реагентов в процессах флотации. Исследовано комплексообразование бензоил- и нонаноилгидразонов ацетона с ионами меди (II) и кобальта (II) в аммиачных растворах методом осаждения. Показана эффективность бензоилгидразона ацетона как собирателя при очистке сточных вод от ионов кобальта (II).

Воронковой О.А. с сотрудниками [24] показана эффективность N-ацил-N-(п-толуолсульфонил)гидразинов в качестве собирателей при доочистке щелочных сточных вод от миллиграммовых количеств цветных металлов.

В работе [42] изучены кислотно-основные свойства, растворимость, химическая устойчивость этил-2-арил(метил)сульфониламино-4,5,6,7-тетра-гидробензотиофен-3-карбоксилатов. Препаративно выделены и идентифицированы комплексные соединения реагентов с ионами меди (II), кобальта (II), никеля (II). Рассчитаны значения их произведений растворимости.

В исследовании [41] изучено влияние природы заместителя при сульфонильной группе на физико-химические и комплексообразующие свойства сульфонильных производных гидразида 2-этилгексановой кислоты общей формулы $C_4H_9CH(C_2H_5)C(O)NHNHSO_2C_6H_5R$ ($R = H, CH_3, NO_2, NHC(O)CH_3, Cl$) по отношению к ионам меди (II), кобальта (II) и никеля (II).

Наиболее перспективным в области разработки новых реагентов-собирателей для ионной флотации тяжелых металлов из растворов представляется применение квантово-химических методов. Отмечается, что физико-химические представления и компьютерное моделирование – важное направление для подбора и применения эффективных флотореагентов [21].

В квантовой химии в настоящее время широкое применение находит расчет молекулярных электрических моментов, поляризуемостей и электростатических потенциалов. Так, например, в работе [4] для ориентира точности квантово-химических методов были рассчитаны дипольные моменты и поляризуемости 46 молекул с использованием широкого набора методов и базисных параметров. Были оценены методы волновой функции Хартри-Фока (HF), второго порядка Меллера-Плессета (MP2) (в сочетании кластера – одиночном и парном (CCSD)), вместе с PBE, TPSSH, PBE0, B3LYP, M06 и B2PLYP DFT. Были протестированы наборы базисных параметров cc-pVDZ, cc-pVTZ, aug-cc-pVDZ, aug-cc-pVTZ и Sadlej cc-pVTZ. Установлено, что для наборов базисных параметров aug-cc-pVDZ,

Sadlej cc-pVTZ и aug-cc-pVTZ все результаты показывают сопоставимую точность, наиболее точные расчеты получены для aug-cc-pVTZ. CCSD, MP2 или гибридные DFT методы с использованием набора базисных параметров aug-cc-pVTZ в состоянии предсказать дипольные моменты с ошибками RMSD в диапазоне 0,12–0,13 D, поляризуемости – с ошибками RMSD в диапазоне 0,30–0,38 Å³. Расчеты, использующие теорию Хартри-Фока, систематически завышают значения дипольных моментов и поляризуемости. Чистые DFT функционалы, включенные в данное исследование (PBE и TPSS), немного занижают значения дипольных моментов и завышают поляризуемость.

В исследовании [34] проведены квантово-химические расчёты параметров реакционной способности (ПРС) молекулы 2-диацетилгидразина (DAH). Установлено, что в молекуле DAH находятся четыре активных донорных центра: два жестких – на атомах кислорода и два менее жестких – на атомах азота; существуют три ротамерных изомера молекулы 1,2-диацетилгидразина. Это обуславливает возможность существования нескольких комплексов «цинк-диацетилгидразин». Стабильность металлорганических комплексов оценена по значениям степени переноса заряда ΔN , энергии комплексообразования $\Delta E_{\text{ком}}$ и количеству внутримолекулярных водородных связей, так как эти ПРС вносят значительный вклад в общую энергетику комплексообразования и способствуют образованию металлорганических супрамолекулярных структур. Наиболее стабильны комплексы $[\text{Zn}(\text{H}_2\text{O})_3(\text{DAH})_2]$ и $[\text{Zn}(\text{H}_2\text{O})_5(\text{DAH})]^+$. Таким образом, подтверждено, что квантово-химические расчёты позволяют выявлять наиболее энергетически выгодные и конформационно устойчивые структуры.

Важность применения полуэмпирических квантово-химических методов для моделирования межмолекулярного взаимодействия отмечается в работах [2, 5, 20, 30]. Применительно к флотационным реагентам, большой интерес представляет исследование [44], в котором изложены теоретические основы моделирования пространственной структуры и малых, и крупных молекул, а также построения зависимостей их активности от пространственной структуры (на основе 3D QSAR), применительно к крупным молекулам.

В работе [31] проведено квантово-химическое моделирование процессов образования извлекаемых молекулярных систем, выявлен новый класс реагентов-собирателей для применения ионной флотации цинка и меди – сложные эфиры терефталевой кислоты, разра-

ботан комплексный реагент РОЛ, изучены особенности механизма флотационного извлечения катионов цинка и меди (II) из техногенных вод этим реагентом.

В работах П.М. Соложенкина приведены результаты молекулярного моделирования кластеров минералов группы теллуридов металлов с некоторыми флотационными реагентами с целью разработки прогноза оценки активности собирателей при комплексной переработке руд цветных и благородных металлов [39, 40], дана оценка активности реагентов-собирателей О-бутил-N-бензоил-тионокарбамата и О-бутил-N-этилтионокарбамата и высказано мнение, что причиной лучшего взаимодействия меди с тионокарбаматами является заселенность электронами d-орбиталей. В работе [11] представлен один из способов регулирования селективности собирателей-карбоксилатов – введение заместителей в углеводородную цепь жирных кислот. Было выполнено молекулярное моделирование кластеров с применением ChemBio3D и ChemOffice2005 по CambridgeSoft с оптимизацией по MM2. Полуэмпирические расчеты были обеспечены MOPAC. Для определения величины энергии HOMO, LUMO и COMO использован DTF подход. Рассчитаны абсолютная жесткость η и химический потенциал χ по Пирсону и Парру.

S. Voija [1] проведено исследование по повышению селективности метода ионной флотации с применением поверхностно-активных веществ. Рассмотрено комплексообразование и поведение в растворах координационных комплексов некоторых ионов двухвалентных металлов с ДТРА (диэтилентриаминпентауксусной кислотой) и с 2-додецилдиэтилентриаминопентауксусной кислотой (4-C12-ДТРА) на основе констант их устойчивости. Условные константы устойчивости для комплексов пяти переходных металлов с 4-С 12 ДТРА определяли путем измерения конкуренции между 4-С12-ДТРА и ДТРА методом масс-спектрометрии с ионизацией электрораспылением (ESI-MS). Небольшие различия в устойчивости между координационными комплексами ДТРА и 4-С12-ДТРА показали, что длина углеводородного скелета реагентов влияет на устойчивость комплексов незначительно. С использованием УФ-видимой спектроскопии было исследовано, в частности, комплексообразование ионов меди (II). Графическим методом Job было установлено, что молекула реагента 4-С12-ДТРА может координировать до двух ионов меди (II). Результаты, полученные при измерении поверхностного натяжения и использовании метода ЯМР, показали, что ком-

плексообразование ионов двухвалентных металлов связано с поведением 4-С12-ДТРА. В целом, координация ионов металла может быть связана с нейтрализацией заряда комплексообразующей группы реагента 4-С12-ДТРА, что, как результат, приводит к снижению электростатического отталкивания между соседними поверхностями в мицеллах и монослоях. Показано четкое различие между комплексами щелочноземельных и переходных металлов с 4-С12-ДТРА. Это объясняется разницей в координации между двумя группами ионов металлов, как предсказано теорией твердых и мягких кислот и оснований (ЖМКО).

В дальнейшем S. Boija была исследована зависимость между параметрами взаимодействия и эффективностью ионной флотации в комплексах «металл-хелатообразующий ПАВ» с добавлением различных пенообразователей [12]. Параметры взаимодействия были рассчитаны на основе теории растворов Рубинга (Rubingh). Параметры для расчетов были взяты по результатам ЯМР и при измерении поверхностного натяжения. Установлено, что интенсивность взаимодействия для амфотерных ПАВ сильно зависит от pH.

В. Ивановой и Г. Митрофановой [6] установлено соотношение экспериментальных данных с результатами квантово-химических расчетов при флотации эвдиалита. В качестве флотационных собирателей исследованы реагенты четырех классов органических соединений (алкилгидроксамовых кислот, высших нефтяных и жирных кислот, моно- и диалкиловых эфиров фосфорной кислоты). Определены константы диссоциации и устойчивости комплексных соединений циркония с данными реагентами. Исследовано влияние гидрофобных свойств реагентов на степень извлечения циркония. С помощью компьютерного моделирования на основе программы 3D ChemBio программного обеспечения ChemOffice был проведен расчет общих энергетических параметров молекул для исследованных соединений. Определен оптимальный состав и структура образующихся комплексов. Результаты флотации эвдиалита подтвердили преимущества реагентов, подобранных на основании квантово-химических расчетов.

Заключение

Таким образом, на основании анализа последних научных исследований по извлечению тяжелых металлов из растворов методом ионной флотации установлено, что важнейшими современными тенденциями в данной области являются:

– подбор условий, повышающих эффективность процесса до максимально возможного извлечения металлов, с минимальным расходом реагентов, получением воды, очищенной до

норм рыбохозяйственных водоемов;

– синтез и моделирование эффективных реагентов-собирателей, особенно с применением перспективных квантово-химических методов.

Проведение интенсивных исследований в соответствии с вышеуказанными трендами привело к тому, что в настоящее время на основе метода ионной флотации создаются фактически экологически чистые технологии переработки техногенных вод.

Список литературы

1. Boija S. On metal ion chelates and conditional stability constant determination: Method development and selective ion flotation of chelating surfactants // Sundsvall: Mid Sweden University, 2014, 36 p.
2. Christensen A.S., Elstner M., Cui Q. Improving intermolecular interactions in DFTB3 using extended polarization from chemical-potential equalization // Chem. Phys., no. 143, 084123 (2015), URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4929335>.
3. Ghazy S. E., El-Morsy S. M., Ragab A. H. Ion Flotation of Copper (II) and Lead (II) from Environmental Water Samples // J. Appl. Sci. Environ. Manage, 2008, vol. 12(3), pp. 75–82.
4. Hickey A.L., Rowley Ch.N. Benchmarking Quantum Chemical Methods for the Calculation of Molecular Dipole Moments and Polarizabilities // Phys. Chem. A., 2014, vol. 118(20), pp. 3678–3687.
5. Hou S., Bernath P.F. Relationships between dipole moments of diatomic molecules // Phys. Chem. Chem. Phys., 2015, no. 17, pp. 4708–4713.
6. Ivanova V., Mitrofanova G. Flotation of eudialyte: correlation of experimental data with the results of quantum-chemical calculations // Proceedings of XVI Balkan Mineral Processing Congress, Belgrade, Serbia, June 17–19, 2015. Vol. 1. Belgrade: Mining Institute: Academy of Engineering Science of Serbia: University of Belgrade, 2015, pp. 347–351.
7. Medyanik N. L., Girevaya H.Y., Shevelin I. Yu., Girevoi T.A., Refining of mineralized process waters by ionic flotation method // Proceedings of XVI Balkan Mineral Processing Congress, Belgrade, Serbia, June 17–19, 2015. Vol. 1. Belgrade: Mining Institute: Academy of Engineering Science of Serbia: University of Belgrade, 2015, pp. 403–407.
8. Reyes M., Patiño F., Escudero R., Pérez M., Flores M.U., Reyes I.A. Kinetics and Hydrodynamics of Silver Ion Flotation // Mex. Chem. Soc., 2012, vol. 56(4), pp. 408–416.
9. Salmani M. H., Davoodi M., Ehrampoush M.H., Ghaneian M.T., Fallahzadah M.H. Removal of cadmium (II) from simulated wastewater by ion flotation technique // Iranian Journal of Environmental Health Sciences & Engineering, 2013, 10:16, URL: <http://www.ijehse.com/content/10/1/16/>.
10. Soliman M.A., Rashad Gh.M., Mahmoud M.R. Kinetics of ion flotation of Co(II)–EDTA complexes from aqueous solutions // Radiochimica Acta, 2015, vol. 103 (9), pp. 643–652.
11. Solozhenkin P.M., Krausz S. Modified fatty acids as flotation reagents for non- sulfide ores: molecular modeling for prognosis of collector activity evaluation // Proceedings of XVI Balkan Mineral Processing Congress, Belgrade, Serbia, June 17–19, 2015. Vol. 1. Belgrade: Mining Institute: Academy of Engineering Science of Serbia: University of Belgrade, 2015, pp. 327–333.
12. Svanedal I., Boija S., Norgren M., and Edlund H. Headgroup Interactions and Ion Flotation Efficiency in Mixtures of a Chelating Surfactant, Different Foaming Agents, and Divalent Metal Ions // Langmuir, 2014, vol. 30 (22), pp. 6331–6338.
13. Tussupbayev N., Musabekov K., Kudaibergenov S. Macromol. Interaction of synthetic polyam-pholytes with disperse particles // Chem. Phys., 1998, vol. 199, pp. 401–408.

14. Yuan X.Z., Meng Y.T., Zeng G.M., Fang Y.Y., Shi J.G. Evaluation of tea-derived biosurfactant on removing heavy metal ions from dilute wastewater by ion flotation. *Colloid Surface Physicochem Eng Aspect*, 2008, vol. 317, pp. 256–261.
15. Абрютин Д. В., Стрельцов К.А. Перспективы развития процесса ионной флотации // *Изв. вузов. Цветная металлургия*. 2013. № 3. С. 3–6.
16. Алексеева А.С., Ксенофонтов Б.С. Многостадийная модель ионной флотации // *Universum: Химия и биология: электрон. науч. журн.* 2015. № 6 (14). URL: <http://7universum.com/ru/nature/archive/item/2184> (дата обращения: 06.09.2015).
17. Бикбаева Г.А., Орехова Н.Н., Куликова Е.А. Применение клинкера в комплексной технологии переработки техногенных стоков горно-металлургических предприятий // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2013. № 2 (42). С. 22–25.
18. Гидразоны ацетона – потенциальные собиратели для ионной флотации цветных металлов / Чеканова Л.Г., Радусhev А.В., Ельчищева Ю.Б., Мухоморова Д.А. // *Химическая технология*. 2011. № 2. С. 117–122.
19. Изучение свойств органических молекул квантово-химическими методами / Медяник Н.Л., Калугина Н.Л., Варламова И.А., Гиревая Х.Я., Бодьян Л.А. Магнитогорск, 2013. 9 с. Деп. в ВИНИТИ 01.08.2013, № 224-B2013.
20. Изучение сорбционной активности угольной поверхности / Медяник Н.Л., Бодьян Л.А., Варламова И.А., Гиревая Х.Я., Калугина Н.Л., Гиревой Т.А. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2015. №3. С. 11–16.
21. Канарский А.В., Соложенкин П.М. Взаимодействие антимонита с сульфгидрильными реагентами по данным молекулярного моделирования // *Изв. вузов. Цветная металлургия*. 2014. № 4. С. 9–15.
22. Карлина А.И. Анализ современных и перспективных способов воздействия на природные и сточные воды // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2015. № 5 (100). С. 146–150.
23. Клименко Т.В. Очистка сточных вод от ионов тяжелых металлов // *Современные научные исследования и инновации*. 2013. № 11. С. 11.
24. Комплексообразование и флотация ионов цветных металлов из щелочных растворов с N-ацил-N-(n-толуолсульфонил) гидразинами / Воронкова О.А., Чеканова Л.Г., Щербань М.Г., Радусhev А.В., Павлов П.Т., Чернова Г.В. // *Журнал прикладной химии*. 2012. Т. 85. Вып. 12. С. 2005–2010.
25. Концентрирование ионов Cu(II), Co(II), Ni(II) с N-(2-гидроксиэтил) алкиламинами / Чеканова Л.Г., Радусhev А.В., Насретдинова Т.Ю., Колташев Д.В., Наумов Д.Ю. // *Изв. вузов. Цветная металлургия*. 2012. № 1. С. 10–15.
26. Ксенофонтов Б.С. Возможности интенсификации извлечения ионов металлов из сточных вод // *Безопасность жизнедеятельности*. 2013. № 1. С. 20–23.
27. Ксенофонтов Б.С., Антонова Е.С. Модели флотационных и сопутствующих процессов очистки воды // *Безопасность жизнедеятельности*. 2014. № 10. С. 42–48.
28. Леснов А.Е., Кудряшова Л.Г., Ризванова О.С. Ионная флотация некоторых многозарядных катионов металлов оксифосом Б // *Изв. вузов. Химия и химическая технология*. 2014. Т. 57. Вып. 8. С. 40–43.
29. Леснов А.Е., Кудряшова О.С., Бирин О.С. Применение синтаида-5 для флотации ионов металлов // *Вестник Пермского университета. Серия: Химия*. 2014. № 3. С. 80–85.
30. Медяник Н.Л. Исследование продуктов взаимодействия молекул реагента РОЛ с ионами цинка и меди (II) методами ИК-Фурье- и масс-спектрометрии // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2010. № 4. С. 20–25.
31. Медяник Н.Л., Варламова И.А., Калугина Н.Л. Применение ионной флотации для извлечения меди и цинка из техногенных рудничных вод // *Сталь*. 2014. № 7. С. 119–123.
32. Медяник Н.Л., Варламова И.А., Калугина Н.Л. Особенности подбора органических реагентов-комплексообразователей квантово-химическим методом для селективного извлечения катионов тяжелых металлов из растворов // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2013. № 3 (43). С. 14–19.
33. Медяник Н.Л., Гиревая Х.Я. Извлечение ионов меди из сточных вод с помощью осадителей-восстановителей // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2007. № 1. С. 113–114.
34. Оценка стабильности металлорганических комплексов квантово-химическим методом / Медяник Н.Л., Шадрунова И.В., Варламова И.А., Калугина Н.Л., Гиревая Х.Я. // *Фундаментальные исследования*. 2015. № 2–6. С. 1198–1203.
35. Очистка вод от ионов тяжелых металлов адсорбционным методом / Тусупбаев Н.К., Мусабеков К.Б., Балыкбаева Г.Т., Жанбеков Х.Н., Кусаинова Ж.Ж., Муздыбаева Ш.А. // *Вестник КазНУ*. 2003. № 3. С. 250–255.
36. Перлова О.В., Чернецкая В.В., Мокшина. Е.Г. Реагент «Азол 1019, марка В» как флотационный коллектор соединений урана (VI) и тория (IV) // *Вода: химия и экология*. 2014. № 5. С. 88–93.
37. Применение новых собирателей при флотации золотосодержащих руд месторождения Балажал / Бектурганов Н.С., Тусупбаев Н.К., Ержанова Ж.А., Билялова С.М., Есенгазиев А.М., Сулаквелидзе Н.В., Арабаев Р.А. // *Прогрессивные методы обогащения и комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья. Плаксинские чтения – 2014: материалы международного совещания*. Алматы, 2014. С. 253–255.
38. Применение реагента-пенообразователя при флотации полиметаллических руд / Тропман Э.П., Бектурганов Н.С., Тусупбаев Н.К., Ержанова Ж.А., Абдикулова А.О. // *Прогрессивные методы обогащения и комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья. Плаксинские чтения – 2014: материалы международного совещания*. Алматы, 2014. С. 566–569.
39. Соложенкин П.М. Комплексная переработка руд на основе компьютерного моделирования перспективных модифицированных реагентов // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2015. № 1. С. 430–456.
40. Соложенкин П.М. Молекулярное моделирование тионокарбаматов и их взаимодействия с матрицами медных минералов и пирита // *Обогащение руд*. 2014. № 4 (352). С. 38–44.
41. Физико-химические и комплексообразующие свойства n-(2-этилгексаноил)-N'-сульфонилгидразинов / Чеканова Л.Г., Ельчищева Ю.Б., Павлов П.Т., Воронкова О.А., Боталова Е.С., Мокрушин И.Г. // *Журнал общей химии*. 2015. Т. 85. № 6. С. 923–928.
42. Физико-химические и комплексообразующие свойства этил-2-арил(алкил)сульфониламино-4,5,6,7-тетрагидробензотиофен-3-карбоксилатов / Чеканова Л.Г., Манылова К.О., Павлов П.Т., Ельчищева Ю.Б., Кандакова А.С. // *Журнал общей химии*. 2014. Т. 84. № 6. С. 1025–1029.
43. Филатова Е.Г. Обзор технологий очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов, основанных на физико-химических процессах // *Изв. вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2015. № 2 (13). С. 97–109.
44. Молекулярное моделирование: теория и практика / Хельте Х.-Д., Зиппл В.Д., Роньян Д., Фолькерс Г. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2013. 319 с.
45. Эффективность использования природного сорбента для очистки шахтной воды от ионов тяжелых металлов / Тусупбаев Н.К., Муздыбаева Ш.А., Мусабеков К.Б., Айдарова С.Б. // *Вестник КазНУ. Серия химическая*. 2003. № 1. С. 94–100.
46. Юсупова А.И. Очистка сточных вод, содержащих ионы тяжелых металлов, сорбентами и экстрактами из таннинсодержащих отходов: дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2015. 165 с.

Материал поступил в редакцию 23.11.15.

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-1-18-26

REMOVING OF HEAVY METALS FROM SOLUTIONS BY THE ION FLOTATION METHOD

Medyanik Nadezhda Leonidovna – D.Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of Chemistry, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7 (3519) 29-85-22. E-mail: chem@magtu.ru.

Tussupbayev Nesipbay Kuandykovich – D.Sc. (Eng.), Associate Professor, Head of the Laboratory of Flotation Reagents and Enrichment of the 'Center of Earth Sciences, Metallurgy and Enrichment' Joint Stock Company, Almaty, Republic of Kazakhstan.

Varlamova Irina Aleksandrovna – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Girevaya Khanifa Yanshaevna – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Kalugina Natalia Leonidovna – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Abstract. This article provides an overview of the latest scientific research in the field of heavy metals removal from solutions by the ion flotation method.

The objective of the research conducted is to analyse the current development trends of the theory and practice of ion flotation as the basis for clean industrial water treatment technologies. The main development trends of the ion flotation method applied to industrial solutions have been determined. These trends are the following: selection of conditions increasing the efficiency of the process up to the maximum possible metal removal; minimum consumption of reagents with the possibility to regenerate them and to obtain the maximum purified water; evaluation of properties of collectors, the "metal-reagent" complex structures, and complexing mechanisms; synthesis and modeling of efficient collectors, especially with advanced quantum-chemical methods. At present, calculations of the molecular electric moments, polarizabilities, charge-transfer degree, absolute hardness, Parr-Pearson chemical potential, complexing energy, and a number of intramolecular hydrogen bondings have a widespread application in the quantum chemistry of flotation reagents. The reason is that these characteristics determine the possibility to use reagents in flotation processes on the basis of the most energetically favourable and conformationally stable removable structures. Theoretical bases have been developed for modeling the spatial structure of both small and large molecules and building dependences of their activity on the spatial structure. The experimental data and the results of quantum chemical calculations have been correlated. The results of a flotation test have proved the attraction of flotation reagents selected on the basis of quantum chemical calculations. Active studies in accordance with the trends mentioned above have introduced sustainable industrial water treatment technologies based on ion flotation.

Keywords: Heavy metals, technological waters, ion flotation, collecting reagents, quantum-chemical methods.

References

1. Boija S. On metal ion chelates and conditional stability constant determination: Method development and selective ion flotation of chelating surfactants. Sundsvall: Mid Sweden University, 2014, 36 p.
2. Christensen A.S., Elstner M., Cui Q. Improving intermolecular interactions in DFTB3 using extended polarization from chemical-potential equalization. *J. Chem. Phys.*, No. 143, 084123 (2015), URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4929335>.
3. Ghazy S. E., El-Morsy S. M., Ragab A. H. Ion Flotation of Copper (II) and Lead (II) from Environmental Water Samples. *J. Appl. Sci. Environ. Manage.*, 2008, vol. 12(3), pp. 75-82.
4. Hickey A.L., Rowley Ch.N. Benchmarking Quantum Chemical Methods for the Calculation of Molecular Dipole Moments and Polarizabilities. *J. Phys. Chem. A*, 2014, vol. 118(20), pp. 3678-3687.
5. Hou S., Bernath P.F. Relationships between dipole moments of diatomic molecules. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2015, no. 17, pp. 4708-4713.
6. Ivanova V., Mitrofanova G. Flotation of eudialyte: correlation of experimental data with the results of quantum-chemical calculations. *Proceedings of XVI Balkan Mineral Processing Congress, Belgrade, Serbia, June 17-19, 2015. Vol. 1. Belgrade: Mining Institute: Academy of Engineering Science of Serbia: University of Belgrade, 2015, pp. 347-351.*
7. Medyanik N. L., Girevaya H.Y., Shevelin I. Yu., Girevoy T.A., Refining of mineralized process waters by the ionic flotation method. *Proceedings of XVI Balkan Mineral Processing Congress, Belgrade, Serbia, June 17-19, 2015. Vol. 1. Belgrade: Mining Institute: Academy of Engineering Science of Serbia: University of Belgrade, 2015, pp. 403-407.*
8. Reyes M., Patiño F., Escudero R., Pérez M., Flores M.U., Reyes I.A. Kinetics and Hydrodynamics of Silver Ion Flotation. *J. Mex. Chem. Soc.*, 2012, Vol. 56(4), pp. 408-416.
9. Salmani M. H., Davoodi M., Ehrampoush M.H., Ghaneian M.T., Fallahzadah M.H. Removal of Cadmium (II) from simulated wastewater by ion flotation technique // *Iranian Journal of Environmental Health Sciences & Engineering*, 2013, 10:16, Available at: <http://www.ijehse.com/content/10/1/16/>.
10. Soliman M.A., Rashad Gh.M., Mahmoud M.R. Kinetics of ion flotation of Co (II)-EDTA complexes from aqueous solutions. *Radiochimica Acta*, 2015, vol. 103 (9), pp. 643-652.
11. Solozhenkin P.M., Krausz S. Modified fatty acids as flotation reagents for non-sulfide ores: molecular modeling for prognosis of collector activity evaluation. *Proceedings of XVI Balkan Mineral Processing Congress, Belgrade, Serbia, June 17-19, 2015. Vol. 1. Belgrade: Mining Institute: Academy of Engineering Science of Serbia: University of Belgrade, 2015, pp. 327-333.*
12. Svanedal I., Boija S., Norgren M., and Edlund H. Headgroup Interactions and Ion Flotation Efficiency in Mixtures of a Chelating

- Surfactant, Different Foaming Agents, and Divalent Metal Ions. *Langmuir*, 2014, vol. 30 (22), pp. 6331-6338.
13. Tussupbayev N., Musabekov K., Kudaibergenov S. Macromol. Interaction of synthetic polyam-pholytes with disperse particles. *Chem. Phys.*, 1998, vol. 199, pp.401-408.
14. Yuan X.Z., Meng Y.T., Zeng G.M., Fang Y.Y., Shi J.G. Evaluation of tea-derived biosurfactant on removing heavy metal ions from dilute wastewater by ion flotation. *Colloid Surface Physicochem Eng. Aspect*, 2008, vol. 317, pp. 256-261.
15. Abryutin D.V., Streltsov K.A. Ion flotation development prospects. *Izvestia vuzov. Tsvetnaya metallurgiya* [Bulletin of Higher Educational Institutions. Non-ferrous Metallurgy]. 2013, no. 3, pp. 3-6.
16. Alekseeva A.S., Ksenofontov B.S. Multi-stage model of ion flotation. *Universum: Khimia i biologiya: elektron. nauchn. zhurn.* [Universum: Chemistry and Biology: Electronic Academic Journal]. 2015, no. 6 (14), Available at: <http://7universum.com/ru/nature/archive/item/2184> (accessed: 06.09.2015).
17. Bikbaeva G.A., Orekhova N.N., Kulikova E.A. Clinker in an integrated processing technology of industrial effluents of mining and smelting enterprises. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2013, no. 2 (42), pp. 22-25.
18. Chekanova L.G., Radushev A.V., Yelchishcheva Yu.B., Muksinova D.A. Acetone hydrazones – potential collectors for non-ferrous metal ion flotation. *Khimicheskaya tekhnologiya* [Chemical Technology]. 2011, no. 2, pp. 117-122.
19. Medyanik N.L., Kalugina N.L., Varlamova I.A., Girevaya Kh.Ya., Bodyan L.A. *Izuchenie svoystv organicheskikh molekul kvantovokhimicheskimi metodami* [Quantum-chemical methods in the study of properties of organic molecules]. Magnitogorsk, 2013.
20. Medyanik N.L., Bodyan L.A., Varlamova I.A., Girevaya Kh.Ya., Kalugina N.L., Girevoy T.A. Study of the sorption activity of the coal surface. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 3, pp. 11–16.
21. Kanarsky A.V., Solozhenkin P.M. Reaction of antimonite with sulfhydryl reagents according to molecular modeling data. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tsvetnaya metallurgiya* [Bulletin of Higher Educational Institutions. Non-ferrous Metallurgy]. 2014, no. 4, pp. 9-15.
22. Karlina A.I. Analysis of modern and advanced methods of exposure on natural and sewage waters. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Vestnik of Irkutsk State Technical University]. 2015, no. 5 (100), pp. 146-150.
23. Klimenko T.V. Treatment of sewage waters containing heavy metal ions. *Sovremennye nauchnye issledovaniia i innovatsii*. [Modern Research and Innovations]. 2013, no. 11, pp. 11.
24. Voronkova O.A., Chekanova L.G., Shcherban M.G., Radushev A.V., Pavlov P.T., Chernova G.V. Complexing and flotation of non-ferrous metal ions from alkali solutions with N-acyl-N-(n-toluenesulfonyl) hydrazines. *Zhurnal prikladnoy himii* [Applied Chemistry Journal]. 2012, vol. 85, no. 12, pp. 2005-2010.
25. Chekanova L.G., Radushev A.V., Nasretdinova T.Yu., Koltashev D.V., Naumov D.Yu. Concentrating of Cu(II), Co(II), Ni(II) ions with N-(2-hydroxyethyl)-alkylamines. *Izvestia vuzov. Tsvetnaya metallurgiya* [Bulletin of Higher Educational Institutions. Non-ferrous Metallurgy]. 2012, no. 1, pp. 10-15.
26. Ksenofontov B.S. Possibilities to intensify removal of metal ions from sewage waters. *Bezopasnost zhiznedeyatel'nosti* [Health and Safety]. 2013, no. 1, pp. 20-23.
27. Ksenofontov B.S., Antonova E.S. Models of flotation and concurrent processes of water treatment. *Bezopasnost zhiznedeyatel'nosti* [Health and Safety]. 2014, no. 10, pp. 42-48.
28. Lesnov A.E., Kudryashova L.G., Rizvanova O.S. OXYPHOS B ion flotation of some polyvalent cations of metals. *Izvestiia vuzov. Khimiia i khimicheskaya tekhnologiya* [Bulletin of Higher Educational Institutions. Chemistry and Chemical Technology]. 2014, vol. 57, no. 8, pp. 40-43.
29. Lesnov A.E., Kudryashova O.S., Birina O.S. Synthamid-5 in metal ions flotation. *Vestnik Permskogo universiteta. Seriya: Khimiya* [Vestnik of Perm University. Chemistry series]. 2014, no. 3, pp. 80-85.
30. Medyanik N.L. IR Fourier mass-spectroscopy in the research of products of reaction of ROL-reagent molecules with zinc and copper (II) ions. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2010, no. 4, pp. 20-25.
31. Medyanik N.L., Varlamova I.A., Kalugina N.L. Ion flotation to remove copper and zinc from industrial mine drainage waters. *Stal* [Steel]. 2014, no. 7, pp. 119-123.
32. Medyanik N.L., Varlamova I.A., Kalugina N.L. Quantum-chemical selection patterns of organic complexing reagents for selective removal of heavy metal cations from solutions. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2013, no. 3 (43), pp. 14-19.
33. Medyanik N.L., Girevaya Kh.Ya. Removal of copper ions from sewage waters with precipitating-reducing reagents. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2007, no 1, pp. 113-114.
34. Medyanik N.L., Shadrinova I.V., Varlamova I.A., Kalugina N.L., Girevaya Kh.Ya. Quantum-chemical evaluation of metal-organic complexes stability. *Fundamentalnye issledovaniia* [Fundamental Research]. 2015, no. 2-6, pp. 1198-1203.
35. Tussupbayev N.K., Musabekov K.B., Balykbaeva G.T., Zhanbekov H.N., Kusainova Zh.Zh., Muzydybaeva Sh.A. Adsorption treatment of wastewaters containing heavy metal ions. *Vestnik Kazakhskogo natsional'nogo universiteta* [Vestnik of Kazan National University]. 2003, no. 3, pp. 250-255.
36. Perlova O.V., Chernetskaya V.V., Mokshina. E.G. Azole 1019, grade V reagent as a flotation collector of uranium (VI) and thorium (IV) compounds. *Voda: khimiya i ekologiya* [Water: Chemistry and Ecology]. 2014, no. 5, pp. 88-93.
37. Bekturganov N.S., Tussupbaev N.K., Yerzhanova Z.A., Bilyalova S.M., Yesengaziev A.M., Sulakvelidze N.V., Arabaev R.A. Application of new collectors at flotation of gold-bearing ores of the Balazhal field. *V sbornike: Progressivnye metody obogashcheniia i kompleksnoi pererabotki prirodnogo i tekhnogenogo mineralnogo syria. Plakinskie chteniia - 2014: Materialy mezhdunarodnogo soveshchaniia* [Progressive methods of enrichment and integrated processing of natural and anthropogenic mineral raw materials. Readings from Plaksin – 2014: International Meeting Records]. Almaty, 2014, pp. 253-255.
38. Tropman E.P., Bekturganov N.S., Tussupbaev N.K., Yerzhanova Z.A., Abdikulova A.O. Application of frothers at polymetallic ore flotation. *V sbornike: Progressivnye metody obogashcheniia i kompleksnoi pererabotki prirodnogo i tekhnogenogo mineralnogo syria. Plakinskie chteniia - 2014: Materialy mezhdunarodnogo soveshchaniia* [Progressive methods of enrichment and integrated processing of natural and anthropogenic mineral raw materials. Readings from Plaksin – 2014: International Meeting Records]. Almaty, 2014, pp. 566-569.
39. Solozhenkin P.M. Integrated ore processing on the basis of computer simulation of advanced modified reagents. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)* [Mining Information-Analytical Bulletin (scientific and technical journal)]. 2015, no. 1, pp. 430-456.

40. Solozhenkin P.M. Molecular modeling of dithiocarbamates and their interaction with matrices of copper minerals and pyrites. *Obogashchenie rud* [Ore Concentration]. 2014, no. 4 (352), pp. 38-44.
41. Chekanova L.G., Yelchishcheva Yu.B., Pavlov P.T., Voronkova O.A., Botalova E.S., Mokrushin I.G. Physical-chemical and complex-forming properties of n-(2-ethylhexanoyl)-N'-sulfonylhydrazins. *Zhurnal obshchei khimii* [General Chemistry Journal]. 2015, vol. 85, no. 6, pp. 923-928.
42. Chekanova L.G., Manylova K.O., Pavlov P.T., Yelchishcheva Yu.B., Kandakova A.S. Physical-chemical and complex-forming properties of ethyl-2-aryl(alkyl) sulfonylamino-4,5,6,7-tetrahydrobenzothiophene-3-carboxylates. *Zhurnal obshchei khimii* [General Chemistry Journal]. 2014, vol. 84, no. 6, pp. 1025-1029.
43. Filatova E.G. Overview of technologies to treat effluents containing heavy metal ions based on physical-chemical processes. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya khimiya i biotekhnologiya* [Bulletin of Higher Educational Institutions. Applied Chemistry and Biotechnology]. 2015, no. 2 (13), pp. 97-109.
44. Hans-Dieter Höltje, Wolfgang Sippl, Didier Rognan, and Gerd Folkers. *Molekulyarnoe modelirovanie: teoriya i praktika*. [Molecular Modeling: Basic Principles and Applications]. M.: Binom. Laboratoriya znaniy, 2013, 319 p.
45. Tussupbayev N.K., Muzdybaeva Sh.A., Musabekov K.B., Aidarova S.B. Efficiency of natural sorbents used to remove heavy metal ions from mine drainage waters. *Vestnik Kazakhskogo natsional'nogo universiteta. Seriya khimicheskaya* [Vestnik of Kazan National University. Chemistry series]. 2003, no. 1, pp. 94-100.
46. Yusupova A.I. *Ochistka stochnykh vod, sodержashchikh ioni tyazhiolykh metallov, sorbentami i ekstraktami iz tanninsoderzhashchikh othodov* [Treatment of effluents containing heavy metal ions with sorbents and extracts of tannin wastes]. Doctoral thesis. Kazan, 2015, 165 p.

Удаление тяжелых металлов из растворов методом ионной флотации / Медяник Н.Л., Тусупбаев Н.К., Варламова И.А., Гиревая Х.Я., Калугина Н.Л. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14. №1. С. 18–26. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-1-18-26

Medyanik N.L., Tussupbayev N.K., Varlamova I.A., Girevaya Kh.Ya., Kalugina N.L. Removing of heavy metals from solutions by the ion flotation method. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 1, pp. 18–26. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-1-18-26

УДК 622.765:622.34

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-1-26-33

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СУЛЬФИДРИЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С ГИДРОКСИЛЬНЫМИ РАДИКАЛАМИ И ПРОГНОЗ ИХ В КАЧЕСТВЕ ФЛОТОРЕАГЕНТОВ

Соложенкин П.М.¹, Кубак Д.А.², Петухов В.Н.²

¹ Институт проблем комплексного освоения недр Российской академии наук (ИПКОН РАН), Москва, Россия

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

Аннотация. В работе показана эффективность компьютерной технологии и химических программ для изучения кластеров реагентов, которые содержат две группы: гидрофильную группу, взаимодействующую с водой, и функциональную группу, способную избирательно закрепляться на поверхности депрессируемых минералов. Определены компьютерные параметры минералов, реагентов. Разработана методика прикрепления различных сульфидрильных собирателей к отдельным атомам меди и молибдена кластеров минералов (процесс докинга) и вычислена величина ПОАСа. Созданы модели собирателей с гидроксильными радикалами и с присоединенной водой. Впервые вычислена величина энергии водородной связи отдельных гетероатомов молекулы собирателя с водой. Детально изучены системы кластеров минералов меди и кластеров медных минералов с сульфидрильными собирателями. Для медных минералов обнаружена вторичная свободная молекулярная орбиталь, которая будет способствовать переносу электронной плотности с минерала на атомы собирателя. Установлено, что энергии водородной связи между тионной серой и водородом воды колеблется от –1,92 до – 8,42 Дж/моль. Энергии водородной связи между тиольной серой и водородом воды составляет –9,97 Дж/моль. Наибольшая величина энергии водородной связи характерна для водорода гидроксильной группы собирателя и кислорода воды. Эта величина характеризуется величинами от –5,32 до –26,90 Дж/моль. Наиболее гидрофобной является 3,4-дигидроксibenзодитионовая кислота. Диэтанолдитиокарбаминавая кислота (ДЭДТН) обладает высокой депрессирующей способностью, так как величина энергии водородной связи с водой максимальна и составляет –26,9 Дж/моль. Реагент ИМ-ДА обладает низкой депрессией минералов, так как у него водородная связь порядка –13,0 Дж/моль. Изучены межмолекулярные комплексы с водородной связью, образующиеся между молекулами тионокарбаматов и водой. Наибольшей гидрофилизующей способностью обладает О-бутил-бензоилтионокарбамат (ББТК).

© Соложенкин П.М., Кубак Д.А., Петухов В.Н., 2016

Таким образом, компьютерное моделирование исследованных реагентов позволило заранее оценить их технологические свойства при флотации медных минералов.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, собиратели с гидроксильными радикалами, тионокарбаматы, программа МОРАС 2012, водородная связь, органические депрессоры.

Введение

Молекулярное моделирование – бурно развивающаяся область современной компьютерной химии, играющая важную роль при конструировании органических веществ. Для визуализации и наглядной демонстрации активных центров молекул флотационных реагентов, при дизайне процессов обогащения руд и углей, в частности флотации, авторы широко использовали квантово-химические характеристики реагентов и компьютерное моделирование [1–7].

Перспективным в моделировании флотационных реагентов представляется подход, основанный на изменении строения известной функциональной группировки путем введения в нее различных атомов и заместителей, что, несомненно, расширяет возможности поиска новых реагентов [8].

В настоящей статье исследуется взаимодействие сульфгидрильных реагентов с гидроксильными радикалами с кластерами медных минералов, которые способны образовывать прочные соединения с данными реагентами, а также с молекулами воды, с образованием водородной связи.

Исследование взаимодействия сульфгидрильных реагентов с гидроксильными радикалами с кластерами медных минералов

Авторы использовали программу ChemBio 3D специализированного комплекса ChemOffice корпорации Cambridge Soft в основном для создания 3D моделей минералов, реагентов (композиций) и их комплексов, структуры которых оптимизировали и минимизировали при использовании молекулярной механики – ММ 2 и сохраняли с расширением *mor*.

Расчет же основных данных при компьютерном моделировании минералов, реагентов осуществляли самым современным методом PM 7 с помощью программного модуля МОРАС 2012 с использованием файлов типа ARC и Gaussian Output. Gaussian Output выводит файл расчета основных термодинамических свойств молекулы.

Для исследования водородной связи и построения карт молекулярного электростатического потенциала (МЭСП) реагентов применяли комплекс квантово-механических расчетов HyperChem.

Исследовали собиратели типа диэтанолдитиокарбаминовой кислоты (ДЭДТН), реагента с юпаковским названием O,O-bis(2-((2-hydroxyethyl) amino)ethyl) S-hydrogen phosphorodithioate (ИМ-ДА), реагента с юпаковским названием O,O-bis(2-(bis(2-hydroxymethyl)amino)ethyl) S-hydrogen phosphorodithioate (ИМ-ТА) и 3,4-гидроксibenзодитионовой кислоты (ГБДТН). Карты молекулярного электростатического потенциала (МЭСП) реагентов приведены на **рис. 1**.

Из карт МЭСП видно, что молекула реагента ДЭДТН имеет 7 ярко выраженных центров: 4 – на атомах кислорода гидроксильных групп, 2 – на атомах азота аминогрупп и 1 – на атоме серы сульфидной группировки. К не ярко выраженным центрам относится атом серы тиольной группировки. В молекуле ИМ – ДА ярко выраженных центров 9 и один не ярко выраженный – также атом серы тиольной группировки. В молекуле ИМ – ТА всего два ярко и два не ярко выраженных активных центра (сульфидная и тиольная сера). ГБДТН имеет 7 ярко и один не ярко выраженный центр (атом серы сульфидной группировки).

Детально изучены системы кластеров медных минералов с сульфгидрильными собирателями.

Разработана методика докинга собирателей к отдельным атомам минералов с целью определения у созданного комплекса ряда физико-химических констант. Были рассчитаны молекулярные орбитали для исследуемых соединений НОМО (highest occupied molecular orbital), ЛУМО (lowest unoccupied molecular orbital), в том числе и СОМО (second occupied molecular orbital).

На **рис. 2** показана схема прикрепления диэтанолдитиокарбаминовой кислоты к атому меди халькопирита и 3D созданного комплекса. Аналогичные комплексы были созданы для борнита, ковеллина и молибденита, которые не показаны на рисунке.

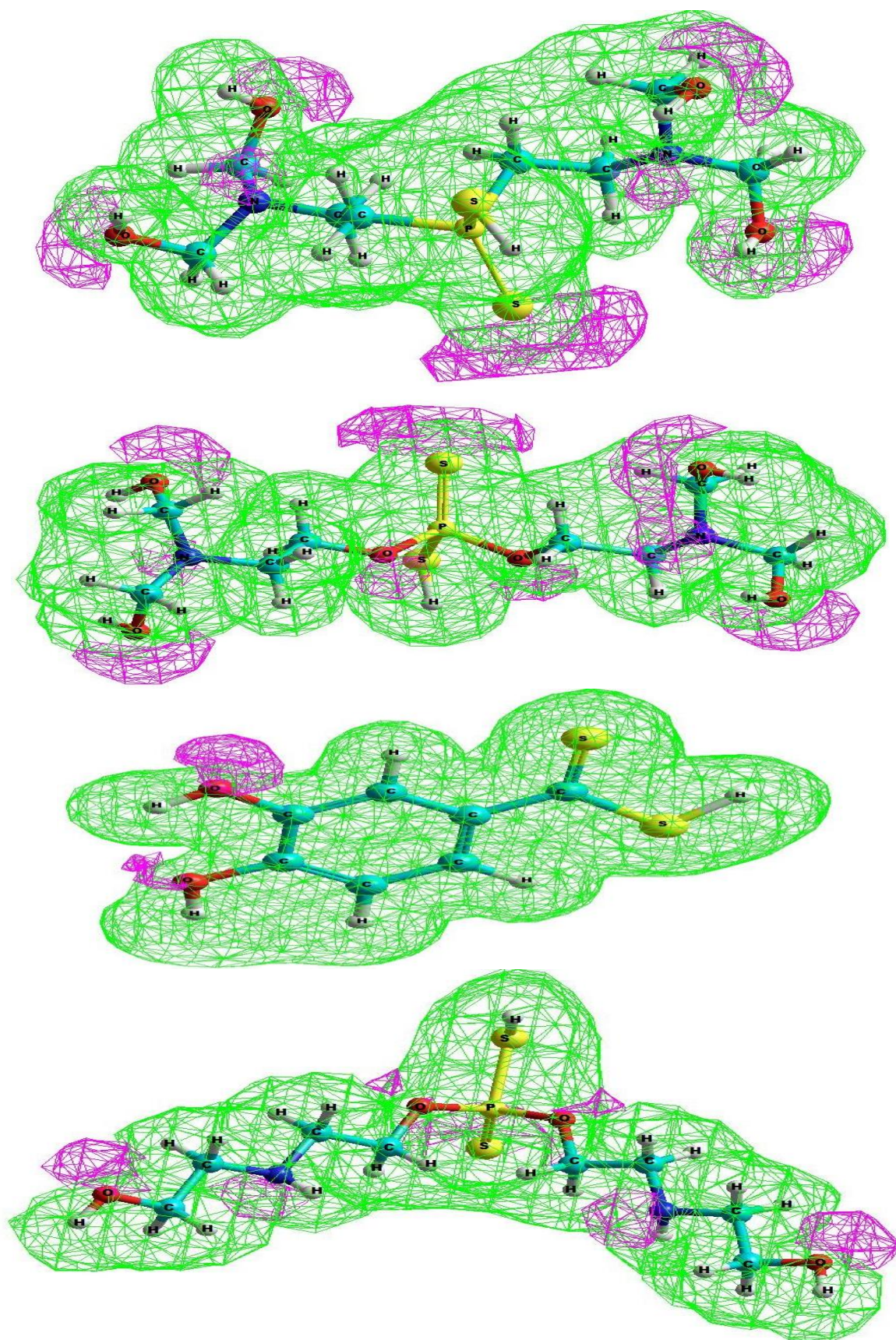


Рис. 1. Карты молекулярного электростатического потенциала реагентов:
ДЭДТН, ИМ – ДА, ИМ – ТА, ГБДТН (сверху вниз)

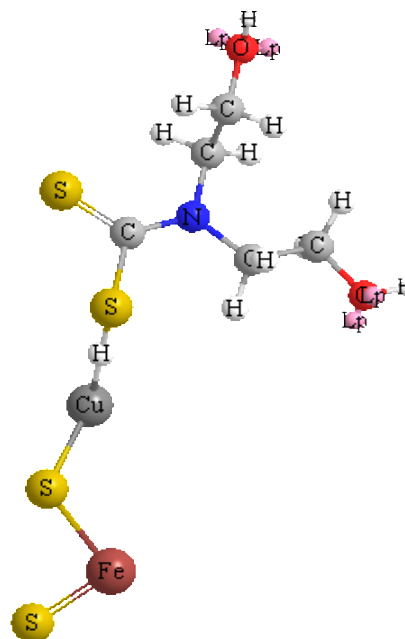
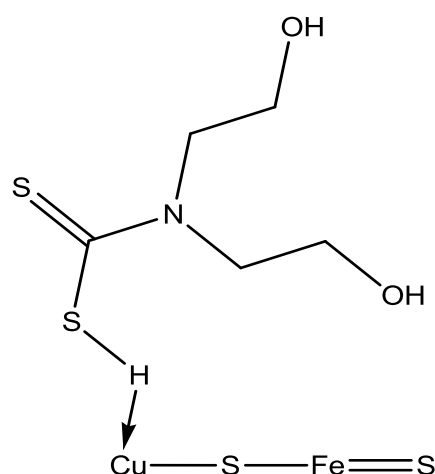


Рис. 2. Схема прикрепления диэтанолдитиокарбаминовой кислоты к атому меди халькопирита и 3 D созданного комплекса

Детально изучены системы кластеров минералов меди и кластеров медных минералов с сульфгидрильными собирателями. Для медных минералов обнаружена вторичная свободная молекулярная орбиталь, которая будет способствовать переносу электронной плотности с минерала на атомы собирателя (табл. 1).

Таблица 1
Величины орбиталей α SOMO LUMO,
 β SOMO LUMO, эВ

Минералы	α SOMO LUMO	β SOMO LUMO
Cu_5FeS_4 борнит	-7.844 –1.534	-7.858 –1.065
CuSFeS халькопирит	-9.140 –1.988	-9.442 –1.404
Cu_3S_3 ковеллин	-8.424 –1.751	-8.348 –1.322
Халькозин	-7.278 –2.071	-6.901 –0.031

Осуществляли оценку активности собирателя (ПОАС) в виде разницы общей энергии комплекса и суммы энергии кластера и энергии собирателя, определяемую по выражению $\Delta E = E_{\text{комплекс}} - (E_{\text{кластер}} + E_{\text{собиратель}})$, эВ (ПОАС)

Чем меньше величина ПОАС, тем более предпочтительно взаимодействие собирателя с кластером минерала (табл. 2). На рис. 3 показаны схемы наиболее прочных (с точки зрения величины энергии водородной связи) межмолекулярных комплексов отдельных атомов сульфгидрильных собирателей с молекулами воды.

Молекулы воды виртуально взаимодействовали с гетероатомами S тионной и тиольной, O, N, H и определяли по известной методике величину водородной связи (Дж/моль).

Таблица 2
Величины ПОАС для минералов и собирателей

Минерал	Величины ПОАС, эВ		
	ДЭДТН	ИМ – Та	(ГБДТН)
Борнит	-0,9487	-3,3452	-1,7256
Халькопирит	-2,9096	-2,0785	-1,1414
Ковеллин $\text{Cu}(1)_2\text{Cu}(2)_1\text{S}_3$	-2,5238	–	-4,6485
Молибденит	-12,503	–	–

Было установлено, что энергия водородной связи между тионной серой и водородом воды колеблется от -1,92 до -8,42 Дж/моль. Энергия водородной связи между тиольной серой и водородом воды составляет -9,97 Дж/моль. Наибольшая величина энергии водородной связи характерна для водорода гидроксильной группы собирателя и кислорода воды. Эта величина характеризуется величинами от -5,32 до -26,90 Дж/моль. Наиболее гидрофобной является 3,4-дигидроксibenзодитионовая кислота. Диэтанолдитиокарбаминовая кислота (ДЭДТН) обладает высокой депрессирующей способностью, так как величина энергии водородной связи с водой максимальна и составляет -26,9 Дж/моль. Реагент ИМ-ДА обладает низкой депрессии минералов, так как у него водородная связь порядка -13,0 Дж/моль.

В ряде работ [9, 10] отмечается высокая селективность действия тионокарбаматов при флотации различных руд.

Функциональная группа тионокарбаматов содержит одновременно 3 гетероатома – кислород, азот и серу. Это обстоятельство служит причиной

специфических свойств тионокарбаматов.

Используемые для флотации руд реагенты должны хорошо гидрофилизировать поверхность минерала. Чем выше будет энергия водородной

связи в системе «реагент-вода», тем сильнее будет гидрофилизация поверхности минералов, что установлено при флотации медных минералов с использованием сульфидрильных собирателей.

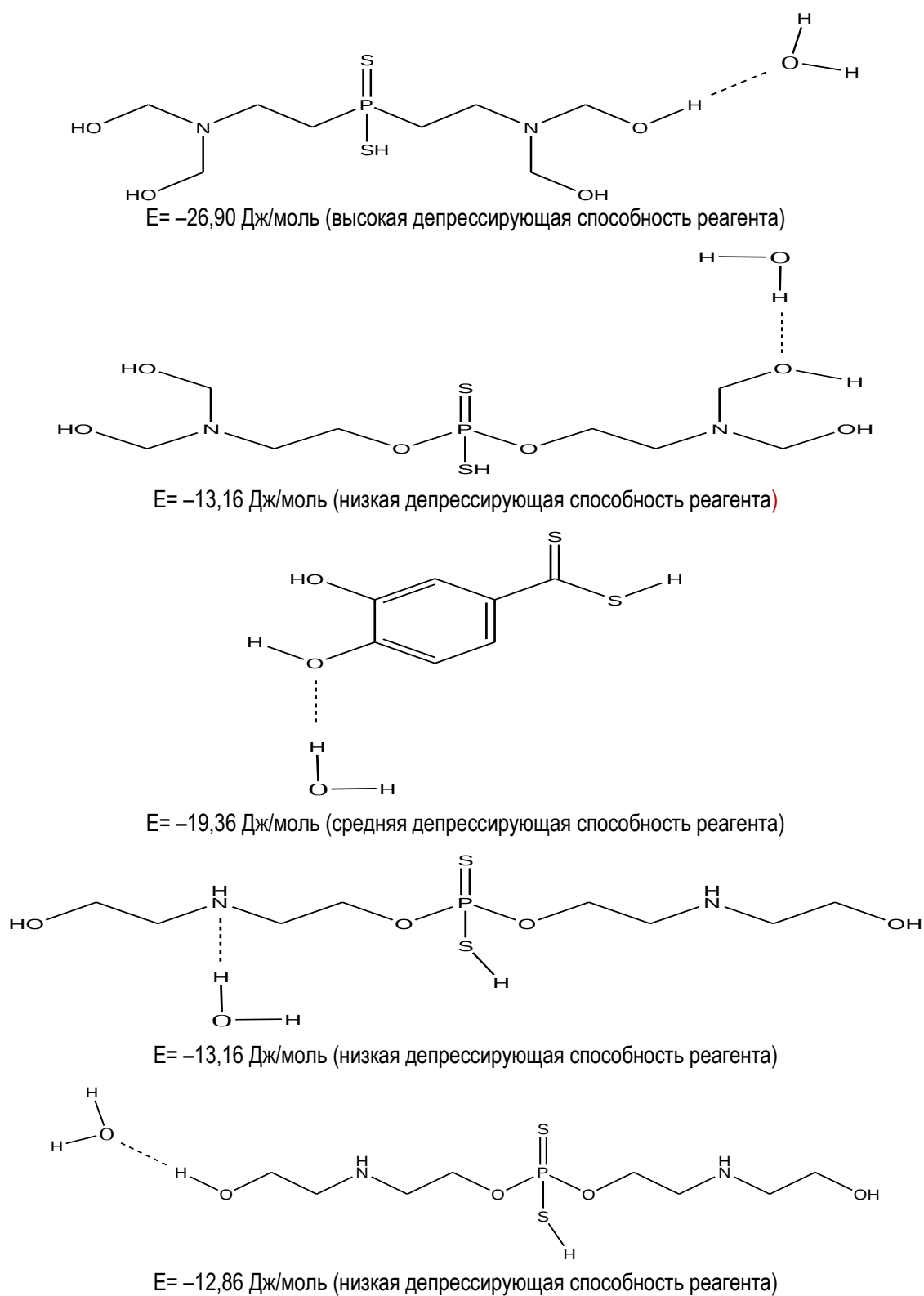


Рис. 3. Схемы моделей водородных связей сульфидрильных собирателей с молекулой воды

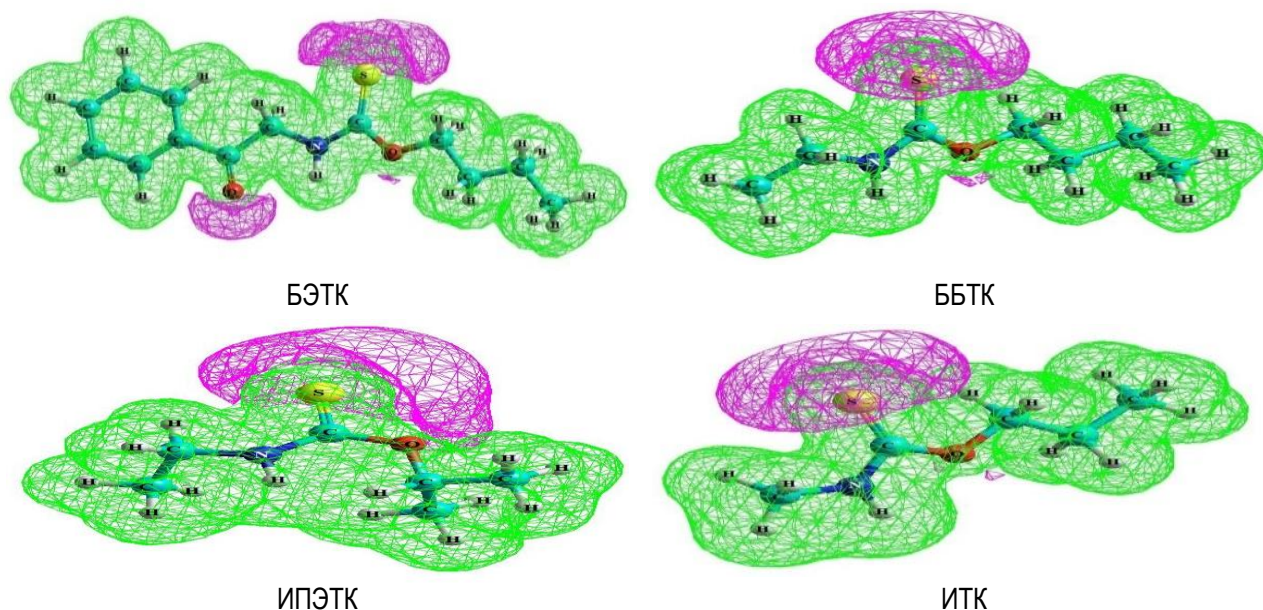


Рис. 4. Карты молекулярного электростатического потенциала тионоккарбаматов

Поэтому в работе рассмотрены структуры тионоккарбаматов с точки зрения возможности образования межмолекулярных комплексов с водородной связью с молекулами воды. Из карт МЭСП видно, что наиболее активные реакционные центры молекул реагентов расположены на атомах кислорода и серы. В молекулах О – бутил – N – этилтионоккарбамата (БЭТК), изопропилэтилтионоккарбамата (ИПЭТК) и О-пропил -N-метилтионоккарбамата (ИТК) видно наличие двух ярко выраженных активных центров (фиолетовые участки), в молекуле О-бутил-N-бензоилтионоккарбамата (ББТК) имеются три активных центра.

Для всех рассматриваемых реагентов наибольшее значение энергии водородной связи характерно для комплексов, образующихся через атом серы (табл. 3).

Наиболее прочные комплексы образуются при взаимодействии ББТК с молекулами воды. Энергии водородной связи межмолекулярных комплексов функциональных групп ББТК составляют – 20,1; 24,3 и 24,5 Дж/моль, что значительно выше энергии водородной связи межмолекулярных комплексов функциональных групп других реагентов (см. табл. 3). Поэтому при закреплении на поверхности минерала ББТК будет сильнее других реагентов гидрофилизировать его поверхность, что в свою очередь увеличит селективность процесса флотации полиметаллических руд.

Таким образом, компьютерное моделирование исследованных реагентов позволило заранее оценить их технологические свойства при флотации медных минералов.

Выводы:

1. Изучено моделирование кластеров медных минералов. Определены компьютерные параметры минералов, заряды отдельных атомов. Установлена вторичная свободная молекулярная орбиталь типа α SOMO LUMO, (ϵ B), β SOMO LUMO, (ϵ B).

2. Разработана методика прикрепления различных сульфидрильных собирателей к отдельным атомам кластеров минералов. Уменьшение величины ПОАС располагается в ряд: молибденит, халькопирит, ковеллин и борнит.

3. Созданы модели собирателей при взаимодействии с водой и впервые вычислена величина энергии водородной связи отдельных гетероатомов молекулы собирателя с водой, которая колеблется в пределах от $E = -26,9$ Дж/моль до $E = -13,16$ Дж/моль.

Таблица 3
Величина энергии водородной связи
в межмолекулярных комплексах реагентов
с молекулами воды, Дж/моль

Реагент	Функциональная группа реагента, с которой молекула воды образует водородную связь			
БЭТК	-7,0	-12,4	-13,9	–
ББТК	-20,1	-24,3	-24,5	-1,2
ИПЭТК	–	-7,9	-14,4	–
ИТК	–	-13,7	-16,7	-5,1

4. Показано, что перспективными органическими депрессорами являются диэтанолдитиокарбаминовая кислота, 3,4-дигидроксibenзодитионовая кислота.

5. При закреплении на поверхности минералов наибольшей гидрофилизующей способностью будет обладать О-бутил-N-бензоилтионокарбамат (ББТК), что обеспечит улучшение селективности флотации полиметаллических руд.

Список литературы

1. Kurkov Aleksander, Pastukhova Irina. Computer modeling of the structure and action of a new class of organophosphorous collectors. Proceeding of the XIV Balcan Mineral processing Congress, Tuzla, 14–16 Juni 2011(edit.by Suncica Masic). 2011. Vol. 11.
2. Molecular Modeling for the Design of Novel Performance Chemicals and Materials, (Ed.) Beena Rai, ISBN: 9781439840788, ISBN 10: 1439840784, Publication Date: March, 2012.
3. Соложенкин П.М. Квантово-химические и молекулярно-динамические аспекты прогнозирования свойств собирателей металлов из продуктивных растворов цветных металлов // Труды международного научного симпозиума «Неделя горняка 2012»: сб. статей. Отдельный выпуск горно-информационного аналитического бюллетеня (научно-технического журнала). М.: Горная книга, 2012. № OR1. 632 с. С. 431–455.
4. Медяник Н.Л., Гиревая Х.Я., Варламова И.А. Квантово-химический подход к выбору реагента собирателя для флотации углей низкой стадии метаморфизма // Кокс и химия. 2006. № 1. С. 8–13.
5. Гиревая Х.Я. Повышение эффективности флотации газовых углей на основе квантово-химического обоснования выбора реагентов: дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск, 2006.
6. Соложенкин П.М. Создание прототипов сульфидных минералов и взаимодействие их с реагентами в процессе флотации и выщелачивания руд квантово-механическим методом // Труды международного научного симпозиума «Неделя горняка 2013»: сб. статей. Отдельный выпуск горно-информационного аналитического бюллетеня (научно-технического журнала). М.: Горная книга, 2013. № OB1. 648 с. С. 397–424.
7. Лавриненко А.А., Свечникова Н.Ю. Исследование квантово-химических характеристик для обоснования флотационной активности реагента // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2008. №1(21). С. 83–85.
8. Соложенкин П.М., Соложенкин О.И. Моделирование флотационных реагентов с тиамидной группировкой с использованием компьютерных технологий // Цветные металлы. 2011. №10.
9. Рябой В.И. О возможности образования дитионной π-связи при взаимодействии тионокарбаматов с медью и халькопиритом // Физической химии. 1981. Т. IV. № 4. С. 56–58.
10. Mielczarski J.A. and Yoon R.H. Spectroscopic Studies of the Structure of the Adsorption Layer of Thionocarbamate.2. On Cuprous Sulfide. Langmuir. 1991, 7, pp. 101–108.

Материал поступил в редакцию 02.02.16.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-1-26-33

COMPUTER-AIDED SIMULATION OF SULPHYDRIC COMPOUNDS WITH HYDROXYL RADICALS WITH FORECAST ON THEIR APPLICATION AS FLOTATION REAGENTS

Solozhenkin Peotr Mikhailovich – D.Sc. (Eng.), Professor, Chief Research Scientist, Federal State Budgetary Scientific Institution Research Institute for the Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences (IPKON of the RAS), Moscow, Russia. E-mail: solozhenkin@mail.ru.

Kubak Denis Anatolievich – Ph.D. (Eng.), Assistant Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Petukhov Vasily Nikolaevich – D.Sc. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7(3519)29-84-33. E-mail: chief.Petuhov 2013@yandex.ru.

Abstract. This article demonstrates the efficiency of computer technology and programmes used in computational chemistry for studying reagent clusters containing two groups: the hydrophilic group interacting with water, and the functional group able to bond to the depressed minerals surface selectively. Computer parameters of minerals and reagents have been determined. The authors have developed a technique of bonding various sulphydric collectors to separate copper atoms and molybdenum minerals clusters (docking). The value of the prognosis of collector activity evaluation has been calculated. Models of collectors with hydroxyl radicals and attached water have been built. Ab initio calculations of the hydrogen bonding interaction energy of separate heteroatoms of the wa-

ter-collector molecule have been made. Systems of clusters of copper minerals and clusters of copper minerals with sulphydric collectors have been studied in detail. A secondary unoccupied molecular orbital has been found for copper minerals. The orbital will enhance transfer of electron density from the mineral to collector atoms. The authors have specified that the value of hydrogen bonding interaction energy between thione sulfur and hydrogen ranges between -1.92 and -8.42 J·mol. The hydrogen bonding interaction energy between thiol sulfur and hydrogen is -9.97 J·mol. The greatest value of the hydrogen bonding interaction energy is specific for hydrogen of a collector hydroxyl group and oxygen, which ranges between -5.32 and -26.9 J·mol. 3,4-dihydroxybenzo-dithioic acid is the

most hydrophobic substance. Diethanol-dithiocarbamic acid has a high depressing efficiency because the value of the water-hydrogen bonding interaction energy is maximum making -26.9 J·mol. IM-DA reagent has a low minerals depression since its hydrogen bonding interaction energy is -13.0 J·mol. Intermolecular hydrogen-bonded complexes forming between thionocarbamate molecules and water have been studied. O-butylbenzoyl-thionocarbamate has an ultimate hydrophilic capacity. Thus, the computer-aided simulation of reagents being studied has made it possible to evaluate their process properties at copper flotation in advance.

Keywords: Computer-aided simulation, collectors with hydroxyl radicals, thionocarbamates, MOPAC2012 program, hydrogen bond, organic depressors.

References

1. Kurkov Aleksander, Pastukhova Irina. Computer modeling of the structure and action of a new class of organophosphorous collectors. Proceedings of the XI Balcan Mineral processing Congress, Tuzla, 14–16 Juni 2011 (ed. by Suncica Masic). 2011, vol. 11.
 2. Molecular Modeling for the Design of Novel Performance Chemicals and Materials, (Ed.) Beena Rai, ISBN: 9781439840788, ISBN 10: 1439840784, Publication Date: March, 2012.
 3. Solozhenkin P.M. Quantum-chemical and molecular-dynamic forecasting aspects of properties of metal collectors from pregnant non-ferrous-metal solutions. *Trudy mezhdunarodnogo nauchnogo simpoziuma «Nedelya gornyaka 2012»: sb. statej. Otdel'nyj vypusk gorno-informatsionnogo analiticheskogo byulletenya (nauchno-tekhnicheskogo zhurnala)* [Mining Engineer Week 2012' International Scientific Symposium Proceedings. Collection of Articles. Special edition of the mining informational analytical bulletin (of the scientific and engineering journal)]. Moscow: Book of Mining Publishing House, 2012, no. OR1. 632 p, pp. 431–455.
 4. Medyanik N.L., Girevaya Kh.Ya. and Varlamova I.A. Quantum-Chemical Approach to the Selection of Collectors for Coal Flotation. *Koks i khimiya* [Koks Khim]. 2006, no.1, pp. 8–13.
 5. Girevaya Kh.Ya. *Povyshenie ehffektivnosti flotatsii gazovykh uglej na osnove kvantovo-khimicheskogo obosnovaniya vybora reagentov: dissertatsiya kandidata tekhnicheskikh nauk* [More effective flotation of G coal by selecting reagents on the basis of quantum-chemical characteristics. Ph.D. dissertation]. Magnitogorsk, 2006.
 6. Solozhenkin P.M. Quantum-mechanical creation of sulphide mineral prototypes and their interaction with reagents at ore floatation and leaching. *Trudy mezhdunarodnogo nauchnogo simpoziuma «Nedelya gornyaka 2013»: sb. statej. Otdel'nyj vypusk gorno-informatsionnogo analiticheskogo byulletenya (nauchno-tekhnicheskogo zhurnala)* [Mining Engineer Week 2013 international scientific symposium proceedings. Collection of articles. Special edition of the mining informational analytical bulletin (of the scientific and engineering journal)]. Moscow: Book of Mining Publishing House, 2013, no. OV1, 648 p, 397–424.
 7. Lavrinenko A.A., Svechnikova N.Y. Study of quantum-chemical characteristics to substantiate reagent flotation capacity. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. Magnitogorsk, 2008, no. 1(21). pp. 83–85.
 8. Solozhenkin P.M., Solozhenkin O.I. Computer-aided simulation of floatation reagents with thioamide groupings. *Tsvetnye metally* [Non-Ferrous metals]. 2011, no. 10.
 9. Riaboy V.I. Formation of back-donation I-bonding at thionocarbamate-copper-chalcopyrite interaction. *Fizicheskoy khimii* [Journal of Physical Chemistry]. 1981, vol. IV, no. 4, pp. 56–58.
 10. Mielczarski J.A. and Yoon R.H. Spectroscopic Studies of the Structure of the Adsorption Layer of Thionocarbamate. 2. On Cuprous Sulfide. *Langmuir*. 1991, 7, pp. 101–108.
- Соложенкин П.М., Кубак Д.А., Петухов В.Н. Компьютерное моделирование сульфидрильных соединений с гидроксильными радикалами и прогноз их в качестве флотореагентов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14. №1. С. 26–33. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-1-26-33
- Solozhenkin P.M., Kubak D.A., Petukhov V.N. Computer-aided simulation of sulphydric compounds with hydroxyl radicals, with forecast on their application as flotation reagents. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 1, pp. 26–33. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-1-26-33

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

УДК 669.162.12

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-1-34-40

ПУТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕСТНЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ В АГЛОМЕРАЦИОННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ АО «УРАЛЬСКАЯ СТАЛЬ»

Ганин Д.Р.¹, Дружков В.Г.², Панычев А.А.³, Шаповалов А.Н.¹¹ Национальный исследовательский технологический университет МИСиС, Новотроицк, Россия² Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия³ АО «Уральская Сталь», Новотроицк, Россия

Аннотация. Приведены основные технико-экономические, технологические и качественные показатели производства агломерата в АО «Уральская Сталь». Выполнена оценка показателей агломерационного производства и качества агломерата по данным технических отчетов о работе аглоцеха. Установлены основные технические и технологические факторы, ограничивающие показатели агломерационного производства в условиях АО «Уральская Сталь». Проведен критический анализ известных способов повышения эффективности аглопроцесса с учетом специфики действующего агломерационного производства. В качестве приоритетного способа улучшения показателей работы аглоцеха АО «Уральская Сталь» предложено использование в аглошихте минеральных добавок, улучшающих окомкование и способствующих активизации процессов минералообразования при спекании. Этот вариант совершенствования технологии аглопроцесса обеспечивает комплексное воздействие на подготовку аглошихты, ход самого аглопроцесса и не требует значительных изменений технологии и оборудования. В качестве минеральных добавок в условиях АО «Уральская Сталь» целесообразно использовать местные ресурсы: бурожелезняковые руды Орско-Халиловской группы месторождений, серпентинитомagneзиты Халиловского месторождения, бентонитовые глины Новокиевского и Воскресенского месторождений. Приведены данные о химическом и минералогическом составах указанных материалов, на основе которых сделаны выводы о их поведении при агломерации. Лабораторными экспериментами подтверждено положительное влияние указанных добавок на ход и результаты спекания. Кроме того, их вовлечение в производство снизит транспортные расходы, решит экологические проблемы с открытыми месторождениями в регионе, обеспечит комплексное применение минеральных ресурсов в Оренбургской области. Для повышения эффективности использования минеральных добавок необходимо подавать их с водой при увлажнении аглошихты в виде пульпы, что обеспечит их активное участие в окомковании и спекании аглошихты.

Ключевые слова: агломерационная шихта, окомкование, агломерация, бурожелезняковая руда, бентонитовая глина, серпентинитомagneзит.

Введение

В ОАО «Уральская Сталь» производство агломерата осуществляется на 4 агломерационных машинах (с площадью спекания каждой 84 м²) из железорудных материалов Бакальского рудоуправления (БРУ), Михайловского и Лебединского ГОКов (МГОК и ЛГОК соответственно). Подготовка агломерационной шихты к спеканию, включающая ее смешивание и окомкование (с увлажнением до 6,5–8,0%), проводится по традиционной схеме в агрегатах барабанного типа – СБ-2,8×6. Это предопределяет необходимость включения в состав аглошихты зернистых руд с целью улучшения газопроницаемости спекаемой шихты, что ведет к

снижению содержания железа в агломерате и ограничивает применение концентратов глубокого обогащения. Поэтому в условиях работы агломерационного цеха АО «Уральская Сталь» основной задачей является увеличение производительности агломашин с повышением (сохранением) качества агломерата при высокой доле тонкозернистых концентратов в аглошихте. Кроме того, актуальным является вовлечение в процесс производства агломерата местного минерального сырья, увеличение использования которого позволило бы снизить расходы АО «Уральская Сталь» на сырье, транспортные перевозки, охрану окружающей среды. В связи с этим существует необходимость поиска возможных направлений совершенствования технологии производства агломерата на предприятии.

© Ганин Д.Р., Дружков В.Г., Панычев А.А., Шаповалов А.Н., 2016

Основная часть

Для определения возможностей по совершенствованию агломерационного процесса в АО «Уральская Сталь» была проведена оценка показателей производства агломерата по дан-

ным технических отчетов о работе аглоцеха за пятилетний период. Некоторые технико-экономические, технологические, качественные показатели работы аглоцеха предприятия приведены в табл. 1–3. Гранулометрический состав компонентов аглошихты приведен в табл. 4.

Таблица 1

Усредненные среднемесячные технико-экономические и технологические показатели работы аглоцеха за пятилетний период

Показатели	Зимний период с ноября по апрель*	Летний период с мая по октябрь*	Среднее за период
Удельная производительность, т/(м ² ·ч)	<u>0,930–1,13</u> 1,08	<u>1,041–1,18</u> 1,138	<u>0,93–1,18</u> 1,11
Содержание тонкозернистых концентратов в шихте, %	<u>56,1–70,4</u> 62,52	<u>58,03–72,78</u> 64,59	<u>56,1–72,78</u> 63,55
Высота слоя шихты, мм	<u>248,0–305,0</u> 265,9	<u>248,0–305,0</u> 285,8	<u>248,0–305,0</u> 275,85
Содержание возврата в шихте, %	<u>22,9–27,1</u> 25,16	<u>22,5–27,5</u> 24,99	<u>22,5–27,5</u> 25,08
Температура шихты, °С	<u>40,0–55,0</u> 47,77	<u>48,0–61,0</u> 54,37	<u>40,0–61,0</u> 51,07
Содержание в шихте горючего углерода, %	<u>3,65–5,09</u> 4,13	<u>3,2–4,68</u> 3,92	<u>3,2–5,09</u> 4,02
Влажность шихты, %	<u>6,82–7,97</u> 7,20	<u>5,05–8,71</u> 7,15	<u>5,05–8,71</u> 7,18
Скорость движения аглоленты, м/мин	<u>1,87–2,70</u> 2,26	<u>1,83–2,72</u> 2,24	<u>1,83–2,72</u> 2,25
Вертикальная скорость спекания, мм/мин	<u>17,34–23,1</u> 19,89	<u>18,6–24,0</u> 21,22	<u>17,34–24,0</u> 20,55
Разрежение в коллекторе, мм в. ст.	<u>551,0–650,0</u> 594,93	<u>483,0–684,0</u> 567,33	<u>483,0–684,0</u> 581,13

* В числителе – интервал изменения, в знаменателе – среднее значение.

Таблица 2

Усредненные среднемесячные данные аглоцеха по составу агломерационной шихты за пятилетний период

Наименование вида сырья	Расход, кг/т агломерата		
	Зимний период с ноября по апрель*	Летний период с мая по октябрь *	Среднее за период
Аглоруда БРУ	<u>90,87–140,0</u> 110,36	<u>22,0–153,46</u> 106,71	<u>22,0–153,46</u> 108,54
Аглоруда МГОК	<u>2,22–166,0</u> 14,66	<u>124,5–275,0</u> 170,08	<u>2,22–275,0</u> 92,37
Концентрат «доменный» МГОК**	<u>17,0–708,7</u> 593,35	<u>0,26–29,22</u> 1,05	<u>0,26–708,7</u> 297,198
Концентрат МГОК	<u>0,28–231,69</u> 9,6	<u>320,0–642,23</u> 422,42	<u>0,28–642,23</u> 216,02
Концентрат ЛГОК	<u>17,72–592,0</u> 44,51	<u>21,04–589,0</u> 128,49	<u>17,72–592,0</u> 86,5
Отходы металлургического производства	<u>92,0–271,99</u> 154,11	<u>78,05–249,26</u> 138,93	<u>78,05–271,99</u> 146,52
Металлодобавки	<u>11,34–44,0</u> 27,71	<u>7,65–42,0</u> 28,95	<u>7,65–44,0</u> 26,95
Известняк	<u>139,5–233,7</u> 184,37	<u>115,2–239,6</u> 170,93	<u>115,2–239,6</u> 177,65
Известь	<u>17,93–42,4</u> 30,69	<u>19,0–35,2</u> 29,18	<u>17,93–42,4</u> 29,93
Доломит	<u>68,0–92,4</u> 11,3	<u>0,3–61,5</u> 7,63	<u>0,3–92,4</u> 9,47
Твердое топливо	<u>41,17–65,1</u> 46,93	<u>33,61–49,7</u> 42,24	<u>33,61–65,1</u> 44,58

* В числителе – интервал изменения, в знаменателе – среднее значение.

** Смесь концентрата магнитной сепарации и аглоруды в соотношении 75:25%.

Таблица 3

Усредненные среднемесячные показатели качества агломерата за пятилетний период

Показатели качества агломерата	Зимний период с ноября по апрель *	Летний период с мая по октябрь *	Среднее за период
Химический состав, %: Fe	<u>48,60–54,40</u> 52,39	<u>50,30–55,40</u> 52,94	<u>48,60–55,40</u> 52,66
FeO	<u>10,60–12,10</u> 11,47	<u>10,20–12,10</u> 11,32	<u>10,20–12,10</u> 11,39
SiO ₂	<u>6,90–9,20</u> 8,48	<u>7,30–8,90</u> 8,32	<u>6,9–9,2</u> 8,40
CaO	<u>12,0–19,50</u> 14,25	<u>10,80–16,10</u> 13,31	<u>10,80–19,50</u> 13,78
Al ₂ O ₃	<u>0,69–1,05</u> 0,857	<u>0,67–1,09</u> 0,875	<u>0,67–1,09</u> 0,866
MgO	<u>1,57–2,80</u> 2,027	<u>1,68–2,40</u> 1,996	<u>1,57–2,80</u> 2,012
S	<u>0,02–0,06</u> 0,042	<u>0,02–0,055</u> 0,039	<u>0,02–0,06</u> 0,04
P ₂ O ₅	<u>0,037–0,051</u> 0,042	<u>0,03–0,05</u> 0,042	<u>0,03–0,051</u> 0,042
Основность CaO/SiO ₂ , ед.	<u>1,40–2,33</u> 1,67	<u>1,33–1,86</u> 1,61	<u>1,33–2,33</u> 1,64
Укладка по железу ($\pm 1,0\%$), %**	<u>78,24–99,16</u> 90,85	<u>67,30–99,46</u> 92,08	<u>67,30–99,46</u> 91,465
Укладка по основности ($\pm 0,1$ ед.), %**	<u>64,77–97,78</u> 84,875	<u>55,30–96,51</u> 87,398	<u>55,30–97,78</u> 86,14
Зерновой состав (мм), %: +40	<u>2,20–11,10</u> 4,36	<u>1,60–9,0</u> 4,06	<u>1,60–11,10</u> 4,21
40–25	<u>8,50–21,20</u> 12,62	<u>10,20–21,10</u> 14,13	<u>8,50–21,20</u> 13,37
25–10	<u>28,70–40,70</u> 34,67	<u>28,70–41,40</u> 34,47	<u>28,70–41,40</u> 34,57
10–5	<u>24,40–42,30</u> 32,57	<u>22,70–35,70</u> 31,63	<u>22,70–42,30</u> 32,10
5–0	<u>14,60–17,10</u> 16,013	<u>13,70–17,20</u> 15,74	<u>13,70–17,20</u> 15,875
Показатели прочности, %: удар	<u>65,00–72,30</u> 68,02	<u>66,70–72,80</u> 68,53	<u>65,0–72,80</u> 68,28
истираемость	<u>4,90–5,60</u> 5,19	<u>5,10–5,70</u> 5,23	<u>4,90–5,70</u> 5,21

* В числителе – интервал изменения, в знаменателе – среднее значение.

** До июня 2011 года применялись требования к укладке по железу и основности в $\pm 0,5\%$ и $\pm 0,05$ ед. соответственно.

Таблица 4

Гранулометрический состав компонентов агломерационной шихты *[1]

Компоненты аглошихты	Содержание фракции, % **					
	+10 мм	10–5 мм	5–3 мм	3–1 мм	1–0,5 мм	0,5–0 мм
Аглоруда БРУ	<u>6,65–11,59</u> 8,81	<u>13,55–16,8</u> 14,74	<u>11,6–14,3</u> 12,88	<u>22,2–24,8</u> 23,44	<u>14,1–20,3</u> 18,08	<u>19,3–24,6</u> 22,05
Аглоруда МГОК	<u>12,8–19,7</u> 16,76	<u>10,8–15,7</u> 13,20	<u>6,4–10,2</u> 8,61	<u>9,5–12,8</u> 11,53	<u>8,9–11,4</u> 10,27	<u>37,9–42,4</u> 39,64
Концентрат МГОК	0	0	0	0	0	100
Известняк аккермановский	0	<u>0–4,8</u> 1,20	<u>8,2–16,4</u> 10,73	<u>30,2–34,9</u> 31,80	<u>16,2–23,7</u> 19,96	<u>32,4–38,7</u> 36,31
Известь	<u>23,9–33,6</u> 27,95	<u>39,1–51,7</u> 43,44	<u>9,4–20,4</u> 15,51	<u>3,4–6,7</u> 5,50	<u>2,9–4,0</u> 3,54	<u>2,1–5,0</u> 4,06
Коксовая мелочь	0	<u>2,2–8,6</u> 5,17	<u>7,9–15,4</u> 12,10	<u>28,3–31,6</u> 29,51	<u>19,1–25,8</u> 22,74	<u>26,1–33,1</u> 30,45
Возврат	<u>3,08–6,50</u> 4,69	<u>26,88–38,56</u> 34,20	<u>8,9–23,84</u> 18,87	<u>19,79–26,9</u> 32,77	<u>14,24–24,0</u> 19,46	

* По результатам рассева просушенных материалов (в период исследования концентрат Лебединского ГОКа не использовался).

** В числителе – интервал изменения, в знаменателе – среднее значение.

Как следует из представленных данных, показатели работы аглоцеха не удовлетворяют современным требованиям доменного производства. Ограниченная мощность эксгаустера при низкой герметичности вакуумной системы не позволяет работать с высоким вакуумом. Это, наряду с неудовлетворительным качеством подготовки аглошихты [1], ограничивает высоту спекаемого слоя, скорость спекания и производительность. В зимних условиях (когда температура шихты из-за нехватки тепла от ввода возврата и гашения извести снижается ниже точки росы) помимо снижения высоты спекаемого слоя вынуждены ограничивать количество тонкозернистых концентратов в спекаемой шихте, что приводит к снижению в агломерате доли железа. Увеличение доли концентратов в шихте также сдерживается использованием бедных бакальских сидеритов для обеспечения требуемого содержания MgO в агломерате. Качество агломерата, оцениваемое по барабанной прочности и выходу годного, недостаточно высоко, несмотря на относительно высокое содержание углерода в аглошихте и стабильное содержание FeO, что в большой мере связано с неудовлетворительным гранулометрическим составом компонентов аглошихты:

1) большое количество мелочи в коксике (> 30% фракции 0–0,5 мм) и высокое содержание фракции +3 мм (> 10%) свидетельствуют о плохом исходном составе топлива, его неэффективном дроблении (переизмельчении), что отрицательно сказывается на структуре и прочности агломерата;

2) высокое содержание фракции + 3 мм в извести (> 85%) снижает равномерность ее распределения в аглошихте при смешивании, а пониженная степень обжига (40–60%) приводит к неполному усвоению извести при спекании, снижая прочность агломерата;

3) аглоруды БРУ и МГОК содержат большое количество крупных фракций (до 10–20% фракции +10 мм), плохо усваиваемых при спекании.

Согласно работам [2–4] повысить эффективность агломерации железорудных материалов можно за счет:

1) хорошего усреднения и смешивания шихтовых материалов, обеспечивающего стабильность состава и физических свойств агломерата;

2) увеличения газопроницаемости шихты при её лучшем окомковании, что достигается: поддержанием оптимальной влажности; совершенствованием конструкций и режимов работы окомковательных устройств; введением в шихту вяжущих, прежде всего флюсующих добавок и поверхностно-активных веществ; организацией раздельного окомкования тонкоизмельченных

компонентов и др.;

3) подогрева шихты выше температуры точки росы (горячим возвратом; использованием тепла от гашения извести; пламенем газовых горелок, паром, токами высокой частоты и др.);

4) рационального использования топлива, обеспечивающего равномерность теплового уровня при минимальном расходе топлива (оптимизация гранулометрического состава, накат коксовой мелочи на окомкованную шихту, загрузка шихты в два слоя с пониженным содержанием топлива в нижнем слое и др.);

5) спекания при более глубоком вакууме, избыточном давлении (с наддувом), пульсирующем режиме движения воздуха;

6) создания условий для образования в зоне спекания жидких фаз с желаемыми свойствами (осуществляется вводом добавок, способствующих активизации минералообразования в твердой фазе, образующих легкоплавкие соединения или обеспечивающих устранение из агломерата стекловидных составляющих).

Очевидным вариантом совершенствования технологии агломерации в условиях аглоцеха АО «Уральская Сталь» является повышение вакуума в коллекторе заменой эксгаустеров на более мощные при одновременном повышении герметичности вакуумной системы (герметичности коллектора и модернизации уплотнительных устройств). Это позволит увеличить высоту спекаемого слоя [5] со всеми вытекающими положительными результатами: рост прочности агломерата, снижение расхода топлива в шихту, а также повышение эффективности мероприятий по улучшению газопроницаемости шихты.

Однако этот вариант, как и большинство указанных выше способов повышения эффективности аглопроцесса, связан со значительными затратами на модернизацию производства. В условиях ограниченности материальных ресурсов следует первоочередное внимание уделять способам, оказывающим комплексное воздействие на подготовку аглошихты и ход самого аглопроцесса, не требующим значительных изменений технологии и оборудования. Из перечисленных выше вариантов указанным условиям в большей степени удовлетворяет использование в аглошихте минеральных добавок, улучшающих окомкование и способствующих активизации процессов минералообразования при спекании, в качестве которых применяют: известь, оливины, отходы доменного производства, железные и марганцевые глинистые руды, железный купорос и др. [4].

При выборе добавки следует обращать внимание на местные ресурсы (Орско-Халиловскую

группу месторождений, Воскресенское месторождение), среди которых необходимо выделить следующие: бурожеlezняковые руды Орско-Халиловской группы месторождений (отвальная мелочь Новокиевского месторождения, руды Новопетropавловского и Аккермановского месторождений); серпентинитомагнезиты – побочный продукт производства доломита; бентонитовые глины. Их химический состав приведен в **табл. 5**.

Вовлечение их в производство улучшит результаты аглопроцесса и снизит транспортные расходы, решит экологические проблемы с открытыми месторождениями в регионе, обеспечит комплексное использование минеральных ресурсов в Оренбургской области.

Ввод бурожеlezняковых руд с глинистой пустой породой в состав аглошихты улучшит результаты окомкования. Можно ожидать и активизацию жидкофазного спекания, поскольку входящие в состав руд минералы благодаря наличию оксидов железа и кремния образуют соединения типа фаялита, за счет вязкости которого обеспечивается повышение прочностных свойств агломерата. Эффективность их использования подтвердили результаты лабораторных экспериментов [10], где смешанную шихту при окомковании увлажняли до 7,5–10% пульпой, содержащей от 1,5 до 2,5% пылевидные отходы переработки бурожеlezняковых руд Новокиевского месторождения, представляющие собой железистые хлориты, преимущественно амезит, шамозит и пеннин, с фракцией 0,074 мм до 75 мас. %. Способ позволил повысить прочность агломерата на удар на 7–9%, что можно объяснить активизацией кристаллохимических и пиромеханических превращений. Повышенное со-

держание Cr, концентрация которого в перепельном хромоникелевом чугуна согласно ГОСТ 805-95 ограничена 0,04%, является ограничением использования бурожеlezняковых руд в аглопроизводстве. В связи с этим расход руды в аглошихте должен быть не более 13 кг/т при самых неблагоприятных условиях (доменная плавка на 100% агломерата при полном переходе хрома в чугун).

При окомковании руд и концентратов Курской магнитной аномалии в качестве добавок могут использоваться бентонитовые глины Воскресенского [8] и Новокиевского месторождений, обладающие повышенной сорбционной емкостью и большой удельной поверхностью, что позволит увеличить прочность гранул окомкованной шихты и скорость спекания. При этом можно ожидать увеличения прочности агломерата за счет более равномерного теплового состояния спекаемого слоя.

В составе аглошихты в качестве упрочняющей магнизиальной добавки можно использовать серпентинитомагнезиты Халиловского месторождения, содержащие до 40% MgO. Лабораторные исследования [9] показали, что при постоянстве состава железорудной смеси, условий спекания, их минералогический состав способствует активации твердофазных реакций, положительно сказываясь на результатах аглопроцесса (увеличиваются прочность и выход годного агломерата в сравнении с использованием сидеритов БРУ и сырого доломита в качестве магнизиальных добавок). Ограничением по их использованию является содержание хрома, поэтому расход серпентинитомагнезита не должен превышать 50 кг/т агломерата.

Таблица 5

Химический состав новокиевской отвальной мелочи, новопетropавловских и аккермановских руд, серпентинитомагнезитов Халиловского месторождения, бентонитовых глин Воскресенского месторождения [6–9]

Химический состав, %	Новокиевские отвалы	Новопетropавловская руда	Аkkerмановская руда	Серпентинитомагнезиты Халиловского месторождения	Бентонитовые глины Воскресенского месторождения
Fe	34,8	37,0	32,0	4,09–5,60	10,85
Ni	0,57	0,47	0,4	0,13–0,21	–
Cr	1,2	1,7	1,24	0,17–0,31	–
SiO ₂	19,3	16,8	25,3	36,91–39,16	44,1
Al ₂ O ₃	8,1	11,5	12,8	0,8–3,63	15,34
CaO	2,1	0,52	0,95	0,06–1,21	1,24
MgO	2,5	1,6	1,3	34,7–39,72	–
S	0,045	0,05	0,09	<0,04	0,036
P	0,18	0,24	0,12	<0,04	0,028
n.n.n.	14,1	16,04	11,7	12,82–15,87	11–14

При существующей технологии подготовки аглошихты одной из проблем увеличения количества ее компонентов является ухудшение однородности шихты, снижающее эффект от ввода добавок. Поэтому добавки-активаторы следует подавать с водой при увлажнении аглошихты в виде пульпы. Пневматические форсунки обеспечивают возможность распыления пульпы с содержанием сухого вещества до 26,3% [11], а по данным других исследователей – до 70% [12], хотя предельная величина у авторов вызывает сомнение. При расходе воды на окомкование 30–40 л/т возможно введение добавок до 40–50 кг/т равномерно на поверхность гранул, что обеспечит их активное участие в окомковании и спекании аглошихты. Подача активных добавок на поверхность формирующихся гранул при окомковании позволит улучшить качество подготовки шихты, что даст возможность увеличить высоту слоя аглошихты, долю тонкозернистых концентратов в аглошихте, производительность агломашины, прочность и выход годного агломерата.

Заключение

На основе оценки показателей производства агломерата и качества компонентов агломерационной шихты предполагается дальнейшее исследование возможностей совершенствования технологии производства агломерата в АО «Уральская Сталь»: использование добавок бурожелезняковых руд (различного состава), бентонитовых глин и серпентинитомagneзитов при их подаче в виде пульпы на агломерационную шихту в процессе ее окомкования.

Список литературы

1. Шаповалов А.Н., Овчинникова Е.В., Майстренко Н.А. Повышение качества подготовки агломерационной шихты к спеканию в условиях ОАО «Уральская Сталь» // *Металлург*. 2015. № 3. С. 30–36.
2. Ефименко Г.Г., Гиммельфарб А.А., Левченко В.Е. *Металлургия чугуна*. К.: Выща школа, 1988. 351 с.
3. Основы научных исследований в черной металлургии / В.И. Балтизмандский [и др.]; под общ. ред. Ю. Н. Яковлева. Киев; Донецк: Вища школа, 1985. 205 с.
4. Коротич В.И., Фролов Ю.А., Бездежский Г.Н. Агломерация рудных материалов. Екатеринбург: ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ», 2003. 400 с.
5. Повышение эффективности работы аглофабрики ОАО «ЧМК» / А.Г. Птичников, В.Х. Баринков, Е.А. Казанцев, В.В. Демин, Ю.А. Фролов // *Сталь*. 2011. № 7. С. 6–14.
6. Паньчев А.А. Исследования обогащения природно-легированного сырья для производства нефтегазовых труб в северном исполнении. М.: Издательский дом «Руда и металлы», 2001. 112 с.
7. Особенности выплавки природнолегированных чугунов / Е.В. Братковский, А.Н. Шаповалов, В.В. Бабанак и др. Оренбург: РИК ГОУ ОГУ, 2004. 198 с.
8. Шаповалов А.Н., Заводяный А.В. Использование бентонитовых глин Воскресенского месторождения для производства железорудных окатышей // *Металлург*. 2014. № 5. С. 40–43.
9. Шаповалов А.Н., Заводяный А.В., Братковский Е.В. Применение серпентинитомagneзитов Халиловского месторождения в агломерационном производстве // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 2011. № 3. С. 25–29.
10. Пат. 2471005 Российская Федерация, МПК C22B 1/16. Способ агломерации железорудных материалов / А.А. Паньчев, Д.Р. Ганин, А.П. Никонова. № 2011118719/02, заявл. 11.05.2011, опубл. 27.12.2012, Бюл. № 36. 4 с.
11. Пажи Д.Г., Галустов В.С. Основы техники распыливания жидкостей. М.: Химия, 1984. 256 с.
12. А.с. 1005943 СССР, МКИ B05B 15/02. Форсунка / Г.А. Выговский, Э.П. Бурминский, А.В. Ремизов, С.Г. Выговский. № 3370065/23–05; заявл. 28.12.81; опубл. 23.03.83, Бюл. № 11. 3 с.

Материал поступил в редакцию 22.12.15.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-1-34-40

USE OF LOCAL MINERAL RESOURCES AT THE SINTERING PLANT OF THE "URAL STEEL" JOINT STOCK COMPANY

Ganin Dmitriy Rudolfovich – engineer, Novotroitsk branch of the National University of Science and Technology ‘MISIS’, Novotroitsk, Russia. Phone: +7(3537)67-96-07. E-mail: dmrgan@mail.ru.

Druzhkov Vitaliy Gavrilovich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7(3519)29-84-30.

Panychev Anatoly Alekseevich – Ph.D. (Eng.), Chief Specialist on Natural Resources, "Ural Steel" Joint Stock Company, Novotroitsk, Russia. Phone: +7(3537)66-28-09. E-mail: a.panychev@uralsteel.com.

Shapovalov Aleksey Nikolaevich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Metallurgical Technologies and Equipment, Novotroitsk branch of the National University of Science and Technology ‘MISIS’, Novotroitsk, Russia. Phone: +7(3537)67-96-07. E-mail: alshapo@yandex.ru.

Abstract. This article presents the main technical-economic, technological and qualitative characteristics of sinter production at the "Ural Steel" Joint Stock Company. According to technical reports on the sintering shop operation, the performance of sinter production and quality of

sinter have been evaluated. The main technical and technological factors limiting the performance of sinter production at the "Ural Steel" Joint Stock Company have been determined. The article contains a critical review of the known methods improving efficiency of the sintering process with

due regard to the profile of the existing sinter production. The authors propose a priority method for improving the sinter output produced at the "Ural Steel" Joint Stock Company suggesting that mineral additives promoting pelletizing and accelerating mineral formation during sintering should be used in the sinter charge. This option of sintering process improvement fosters an integrated effect on the sinter charge preparation, flow of the sintering process, and does not require any significant adjustment of technology and equipment. It makes most sense to use local resources such as Orsk-Khalilov brown iron ore deposits, Khalilov serpentinite deposits, and Novokievsk and Voskresensk bentonite clay deposits as mineral additives in the setting of the "Ural Steel" Joint Stock Company. The article presents data on the chemical and mineralogical composition of these materials. Based on these data, conclusions on the behavior of mineral additives during sintering have been drawn. Laboratory experiments have substantiated positive effects of these additives on the progress and results of sintering. In addition, their inclusion in the production process will lower transportation costs, solve environmental problems of open deposits in the region, and ensure a comprehensive use of mineral resources in the Orenburg region. To ensure a sustainable use of mineral additives, it is necessary to supply them with water when moistening the sinter charge into slurry, which will ensure their valuable contribution to sintering charge pelletization and sintering.

Keywords: Sinter charge, pelletizing, sintering, brown iron ore, bentonite clay, serpentinite.

References

1. Shapovalov A.N., Ovchinnikova E.V., Maistrenko N.A. Povyshenie kachestva podgotovki aglomeratsionnoi shikhty k spekaniyu v usloviakh OAO «Uralskaya stal» [Improving Quality of Sinter Charge Preparation at the Ural Steel] Joint Stock Company]. *Metallurg* [Metallurgist]. 2015, No. 3, pp. 30-36.
2. Efimenko G.G., Gimmelfarb A.A., Levchenko V.E. *Metallurgiya chuguna* [Ironmaking]. Kiev: Vyshcha shkola, 1988, 351 p.
3. Baptizmansky V.I. and others. *Osnovy nauchnykh issledovaniy v chernoi metallurgii* [Research basics in ferrous metallurgy]. Kiev, Donetsk: Vyshcha shkola, 1985, 205 p.
4. Korotich V.I., Frolov Yu.A., Bezdezhsky G.N. *Agglomeratsiya rudnykh materialov* [Sintering of ore-bearing materials]. Ekaterinburg: GOU VPO «UGTU-UPI», 2003, 400 p.
5. Ptichnikov A.G., Barinov V.Kh., Kazantsev E.A., Demin V.V., Frolov Yu.A. Povyshenie effektivnosti raboty aglofabriki OAO «ChMK» [Improving the efficiency of the sinter plant 'Chelyabinsk Metallurgical Plant' OJSC]. *Stal'* [Steel], 2011, no. 7, pp. 6-14.
6. Panychev A.A. *Issledovaniya obogashcheniya prirodno-legirovannogo syria dlya proizvodstva neftegazovykh trub v severnom ispolnenii* [Research on the concentration of naturally-alloyed raw materials for the production of pipes for arctic service]. Moskva: Izdatelskii dom «Ruda i metally», 2001, 112 p.
7. Bratkovsky E.V., Shapovalov A.N., Babanakov V.V. and others. *Osobennosti vyplavki prirodnolegirovannykh chugunov* [Melting patterns of naturally-alloyed cast iron]. Orenburg: RIK GOU OGU, 2004, 198 p.
8. Shapovalov A.N., Zavodyany A.V. Ispolzovanie bentonitovykh glin Voskresenskogo mestorozhdeniya dlya proizvodstva zhelezorudnykh okatyshей [Use of Bentonite Clays of the Voskresensk Deposit to Produce Iron-Ore Pellets]. *Metallurg* [Metallurgist]. 2014, no. 5, pp. 40-43.
9. Shapovalov A.N., Zavodyany A.V., Bratkovsky E.V. Primenenie serpentinitomagnezitov Khalilovskogo mestorozhdeniya v aglomeratsionnom proizvodstve. [Application of serpentine-magnesites of the Khalilovo deposit in sintering]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Chemaya metallurgiya* [News of the higher educational institutions. Ferrous metallurgy]. 2011, no. 3, pp. 25-29.
10. Panychev A.A., Ganin D.R., Nikonova A.P. *Sposob agglomeratsii zhelezorudnykh materialov* [Agglomeration method of iron-ore materials]. Patent RF, no. 2471005, 2012.
11. Pazhi D.G., Galustov V.S. *Osnovy tekhniki raspylivaniia zhidkostei* [Basics of liquids atomization techniques]. Moscow: Khimiya, 1984, 256 p.
12. Vygovsky G.A., Burminsky E.P., Remizov A.V., Vygovsky S.G. *Forsunka* [Nozzle]. Certificate USSR, no. 1005943, 1983.

Пути использования местных минеральных ресурсов в агломерационном производстве АО «Уральская сталь» / Ганин Д.Р., Дружков В.Г., Панычев А.А., Шаповалов А.Н. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14. №1. С. 34–40. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-1-34-40

Ganin D.R., Druzhkov V.G., Panychev A.A., Shapovalov A.N. Use of local mineral resources at the sintering plant of the "Ural steel" joint stock company. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 1, pp. 34–40. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-1-34-40

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.774.3

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-1-41-46

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕОРИИ, ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ ТРУБОПРЕССОВЫХ СИСТЕМ

Космацкий Я.И.

Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности, Челябинск, Россия

Аннотация. Представлен обзор перспективных направлений исследований в области совершенствования теории, технологии и оборудования трубопрессовых систем. Показаны особенности функционирования новых энерго-сберегающих способов производства труб методом прессования. На примере результатов экспериментальных исследований с использованием лабораторно-технической базы лаборатории волочения и прессования ОАО «РосНИТИ» и математического моделирования с применением метода конечных элементов, реализованного QForm 2D/3D, показана эффективность применения новых способов и устройств прессования труб и совмещенных с ним процессов, обусловленная снижением величины пресс-остатка при прессовании труб, снижением максимального усилия и пиковых нагрузок на деформирующий инструмент. Представлен инновационный подход к совершенствованию процесса прессования, обеспечивающий расширение сортамента горячепрессованных труб в условиях действующих трубопрессовых систем, обеспечивающий возможность изготовления труб с винтообразным оребрением внутренней поверхности. Проведен анализ результатов моделирования процесса прессования труб при использовании принудительного вращательного движения пресс-иглы и сделан вывод о возможности и целесообразности его применения. Вместе с этим указываются значимые геометрические размеры пресс-игл, учет которых может обеспечить изготовление указанного вида трубной продукции, и приводится ссылка на программное обеспечение, при использовании которого обеспечивается задача инженерных расчетов энергосиловых параметров процесса и геометрических параметров профилировки трубопрессового инструмента для производства труб с винтообразным оребрением внутренней поверхности. В дополнении к обобщенным результатам исследований процесса прямого прессования труб представлено развитие технических и теоретических основ процесса прессования труб с боковым истечением, в том числе при совмещении с процессом литья, редуцирования и принципов аккумуляции энергии. Показана перспективность проведения настоящих и дальнейших исследований.

Ключевые слова: процесс прессования труб, максимальное усилие прессования, пресс-остаток, аккумулирующее устройство, труба с винтообразным оребрением внутренней поверхности, совмещенные способы и устройства для прессования, импортозамещение.

Введение

Существующие технологические процессы обработки металлов давлением обеспечивают систематизацию знаний в рамках соответствующей науки. С ней связаны различные типы теорий научной дисциплины, как фундаментальные, так и частные, например – теория прессования, а также опытные факты, на которые опираются и с которыми должны быть согласованы принципы инновационных технологий.

Исследование условно делится на следующие направления: синергия действующих трубопресс-

совых систем; анализ теоретических разработок устойчивого течения металла и выполнение профиля горячепрессованных труб; исследование деформационных свойств новых материалов.

Синергия действующих трубопрессовых систем, основываясь на анализе теоретических разработок устойчивого течения металла и выполнение профиля горячепрессованных труб, предусматривает разработку новых способов и устройств изготовления горячедеформированных труб. При этом обеспечивается возможность расширения сортамента в области труднодеформируемых металлов и сплавов и изготовления труб новой конструкции. Итак, предлагается рассмотреть следующие технические и теоретические решения.

Результаты исследований

Во-первых, теоретическое исследование граничных условий реализации процесса инерционного прессования труб, заключающегося в протягивании металла из контейнера готовой частью изделия, выполненное в работе [1], позволило разработать рекомендации по совершенствованию способа инерционной выпрессовки пресс-остатка и устройство (рис. 1), обеспечивающих, в совокупности, полное устранение указанной величины. В частности, установлено, что для гарантированного устранения пресс-остатка требуется приложение дополнительных усилий, создаваемых аккумулятирующим устройством, принцип действия которого описан в работах [2, 3], компенсирующих в случае их недостатка со стороны инерционного воздействия готовой части трубы.

При этом следует отметить особенность работы устройства (см. рис. 1), согласно которой передача металлу заготовки накопленной энергии осуществляется постепенно в течение всего рабочего цикла процесса, обеспечивая при этом

плавное возрастание усилия прессования P . В соответствии с представленной на рис. 2 графической зависимостью длительность процесса с применением аккумулятирующего устройства выше, что объясняется работой деформации применяемого устройства.

Во-вторых, дополнительное вращательное движение пресс-иглы расширяет возможности применения процесса прессования в направлении снижения усилия на величину от 2,5 до 5 % (рис. 3), необходимого для изготовления труб из труднодеформируемых металлов и сплавов в промышленных условиях действующих трубопрессовых систем [4].

Одновременно с этим при использовании рациональной профилировки прессового инструмента [5, 6], обеспечивающего устойчивое течение металла, появляется технологическая возможность расширения сортамента трубной продукции и изготовления пресс-изделий с глубокой степенью проработки [7], соответственно с повышенной добавленной стоимостью, а именно трубы с винтообразным оребрением внутренней поверхности (рис. 4).

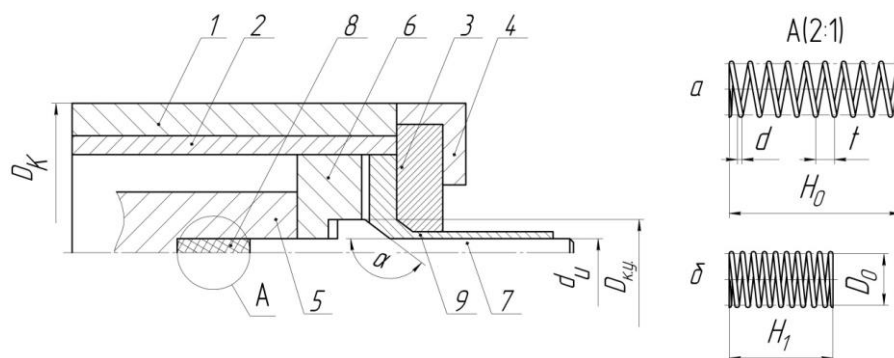


Рис. 1. Схема устройства на стадии выпрессовки пресс-остатка: аккумулятирующее устройство в начальной – конечных (а) и установившейся стадиях процесса (б) соответственно: 1 – контейнер; 2 – втулка контейнера; 3 – матрица; 4 – матрица-держатель; 5 – пуансон; 6 – пресс-шайба; 7 – пресс-игла; 8 – аккумулятирующее устройство; 9 – полый профиль

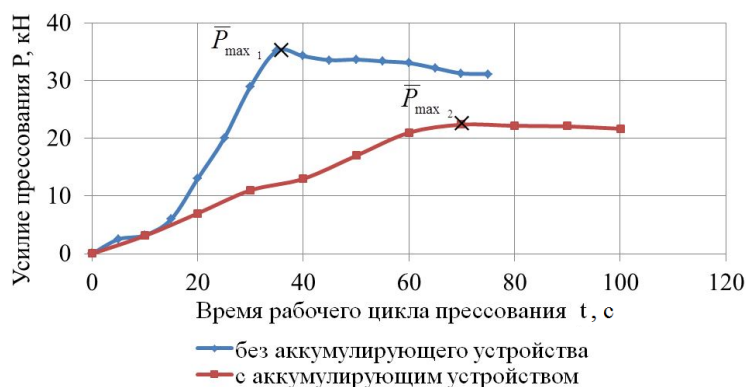


Рис. 2. Зависимость среднего значения усилия прессования от времени рабочего цикла процесса: $\bar{P}_{\max_1} = 35,2$ кН; $\bar{P}_{\max_2} = 22,3$ кН

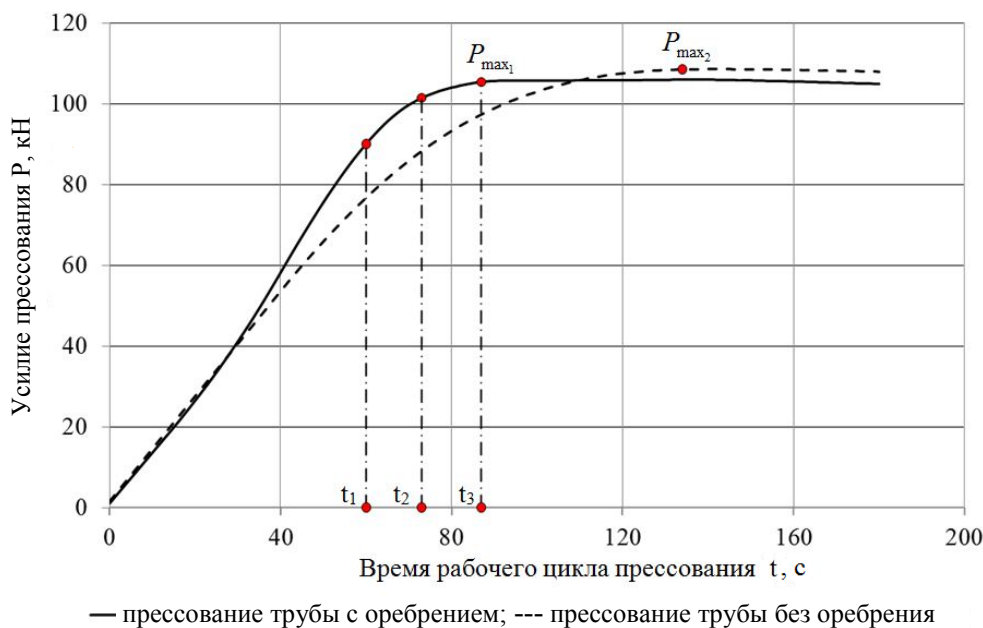


Рис. 3. Зависимости средних значений усилия прессования труб 40×10,0 мм из свинца марки С1 от длительности рабочего цикла (по результатам компьютерного моделирования с использованием QForm 2D/3D): $P_{\max_1} = 106,1$ кН; $P_{\max_2} = 108,7$ кН

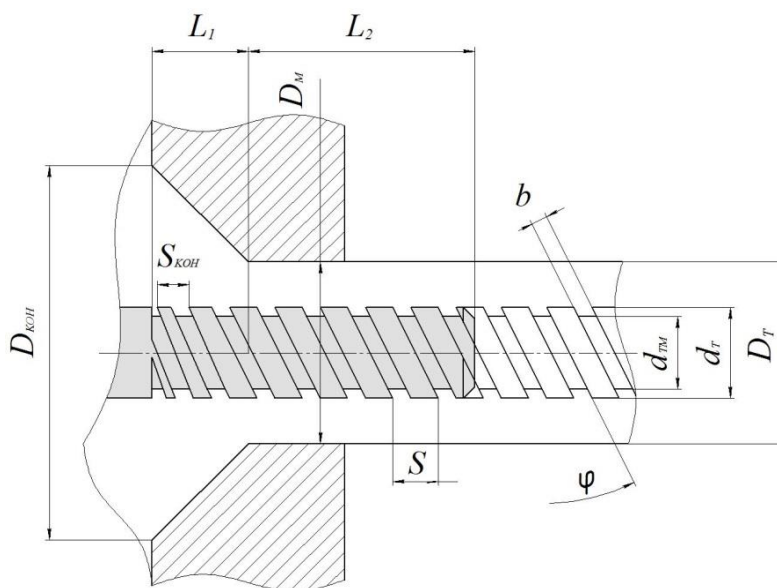


Рис. 4. Геометрические параметры системы пресс-иглы – труба с внутренними винтовыми нарезками: D_t – наружный диаметр трубы; d_t – внутренний диаметр трубы; d_{tm} – малый внутренний диаметр трубы; $S_{кон}$ – шаг нарезок на участке пресс-иглы, соответствующем коническому участку матрицы; $D_{кон}$ – диаметр заходного участка матрицы; b – ширина ребра; φ – угол подъема винтовой линии

При исследовании процесса прессования труб с внутренним винтообразным оребрением следует обратить внимание на три соответствующих временных интервала, стадии которого изображены на рис. 5. При этом, как показано на рис. 3, $t_1 \approx 59,7$ с – момент времени, соответствующий заполнению конического участка

матрицы металлом заготовки (рис. 5, а); $t_2 \approx 72,8$ с – момент времени, сопровождающийся заполнением калибрующего участка матрицы (рис. 5, б); $t_3 \approx 86,6$ с – момент времени, соответствующий установившемуся процессу прессования, после которого наблюдается понижение усилия (рис. 5, в).

В соответствии с зависимостью изменения усилия прессования труб с оребрением, изображенной на рис. 3, увеличение усилия прессования наблюдается до $\sim 86,6$ с, т.е. до момента времени t_3 , при котором передний конец металла «сбегает» с пресс-иглы (рис. 4, в). После t_3 происходит медленное снижение усилия. Наибольшая скорость роста усилия наблюдается на временном интервале до $\sim 59,7$ с. Окончание этого временного интервала соответствует моменту времени t_1 (рис. 4, а). При этом следует отметить, что внутри объема, образованного коническим участком матрицы, происходит наиболее интенсивное формоизменение металла.

Также следует отметить, что до ~ 30 с графические зависимости усилия прессования трубы с вращением пресс-иглы и без вращения практически совпадают. После чего усилие на пуансоне в процессе с вращением пресс-иглы «обгоняет» усилие прессования без вращения пресс-иглы. Вероятно, это связано с тем, что в

этот момент времени металл начинает интенсивно воздействовать на боковую стенку нарезов на пресс-игле, а следовательно, происходит увеличение скорости роста растягивающих напряжений на пресс-игле.

В-третьих, использование принципа совмещения способов обработки металлов давлением, с целью обеспечения высокой маневренности и непрерывности процесса прессования при заданных технологических условиях, позволило разработать следующий комплекс способов и устройств: литье – поперечно-боковое прессование и редуцирование [8], литье – поперечно боковое и прямое прессование с выпрессовкой пресс-остатка [9]. Теоретическое исследование последнего с использованием разработанной математической модели процесса [10] позволило определить максимальное значение усилия прессования и усилия аккумулирующего устройства, обеспечивающего выпрессовку пресс-остатка (рис. 6).

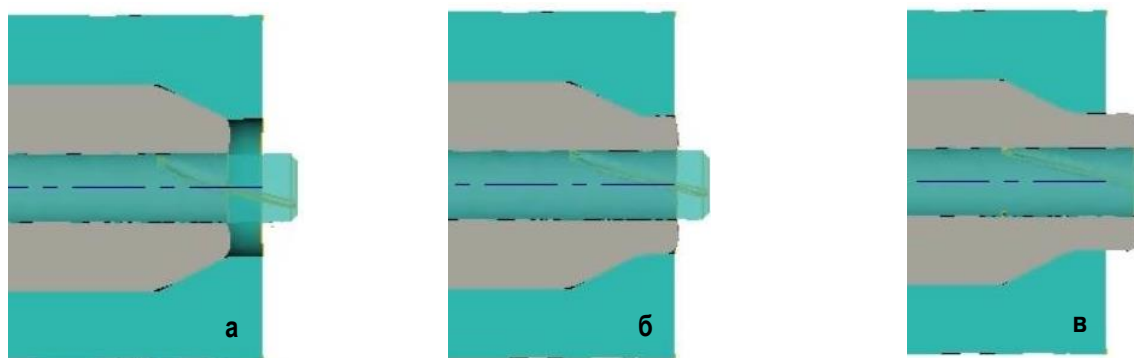


Рис. 5. Стадии процесса прессования труб размером $40 \times 10,0$ мм с винтообразным оребрением внутренней поверхности: а – $t_1 \approx 59,7$ с; б – $t_2 \approx 72,8$ с; в – $t_3 \approx 86,6$ с

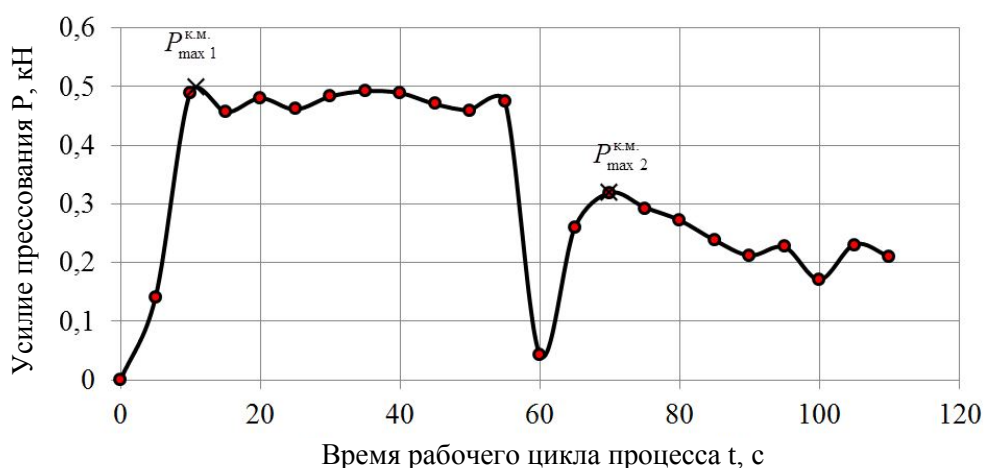


Рис. 6. Изменение усилия прессования на первом и втором этапах совмещенного процесса с применением оригинального устройства для его осуществления [9] при изготовлении медных труб размером 40×10 мм

Заключение

Таким образом, последующее физическое моделирование новых трубопрессовых систем, за исключением инерционного прессования [2, 11] с прямым истечением металла, разработка технико-экономического обоснования их применимости и опытно-промышленное опробование могут способствовать стабилизации конкурентоспособности трубной промышленности (п. 7 Приложения к Приказу № 652 от 31.03.2015), особенно в области неосвоенного сортамента, что является одной из стратегически важных задач РФ, направленных на реализацию Программ импортозамещения [12, 13].

Список литературы

1. Космацкий Я.И. Совершенствование процесса инерционной выпрессовки пресс-остатка // Материалы 65-й научной конференции. Секции технических наук. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2013. Т. 2. С. 11–14.
2. Моделирование процесса прессования труб с использованием устройства инерционной выпрессовки пресс-остатка / Я.И. Космацкий, А.В. Выдрин, Б.В. Баричко и др. // Сталь. 2014. Вып. 11. С. 46–49.
3. Способ прессования полых профилей и устройство для его осуществления: пат. 2535831 Рос. Федерация: МПК⁷ В 21 В 17/00, В 21 С 23/08, В 21 В 25/02 / Я.И. Космацкий, А.В. Выдрин, Б.В. Баричко, Н.В. Фокин, В.Б. Восходов (РФ). № 2013133135/02; заявл. 16.07.13; опубл. 20.12.14, Бюл. №35. 9 с.
4. Космацкий Я.И., Перевозчиков Д.В. Технологические основы процесса изготовления горячепрессованных труб с внутренним оребрением // Труды международной научно-технической конференции «ТРУБЫ-2014»: сб. науч. трудов. Челябинск: ОАО «РосНИТИ», 2014. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
5. Космацкий Я.И., Перевозчиков Д.В. Определение геометрических параметров профилировки инструмента при изготовлении труб с внутренними винтовыми нарезками прессованием // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2014. Т. 14. № 1. С. 80–83.
6. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2014616235. Программный комплекс для определения параметров прессования труб с внутренним винтообразным оребрением / Космацкий Я.И., Перевозчиков Д.В. № 2014613894; заявл. 29.04.2014; опубл. 20.07.2014. 1 с.
7. Бережной, В.Л., Щерба В.Н., Батурин А.И. Прессование с активным действием сил трения. М.: Metallurgy, 1988. 296 с.
8. Устройство для получения полых профилей: пат. 143437 Рос. Федерация: МПК⁷ В 22 D 18/02 / Я.И. Космацкий, А.В. Выдрин, Е.В. Храмов (РФ). № 2014109719/02; заявл. 12.03.14; опубл. 20.07.14, Бюл. №20. 7 с.
9. Устройство для получения полых профилей: пат. 144990 Рос. Федерация: МПК⁷ В 22 D 17/00 / Я.И. Космацкий, Е.В. Храмов, Н.В. Фокин (РФ). № 2014118689/02; заявл. 07.05.14; опубл. 10.09.14, Бюл. №25. 2 с.
10. Космацкий Я.И., Фокин Н.В. Математическое моделирование совмещенного процесса разлива и бокового прессования // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2015. Т. 15. № 1. С. 29–32.
11. Космацкий Я.И., Фокин Н.В. Экспериментальное исследование процесса инерционного прессования труб // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2014. Том 14. № 2. С. 73–77.
12. Российская Федерация. Министр промышленности и торговли Д.В. Мантуров. Приказ № 652 от 31 марта 2015 года: (об утверждении плана мероприятий по импортозамещению в отрасли черной металлургии Российской Федерации). М., 2015. 4 с.
13. Российская Федерация. Министр промышленности и торговли Д.В. Мантуров. Приказ № 651 от 31 марта 2015 года: (об утверждении плана мероприятий по импортозамещению в отрасли цветной металлургии Российской Федерации). М., 2015. 4 с.

Материал поступил в редакцию 20.05.15.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-1-41-46

MAIN DIRECTIONS OF RESEARCH IN THE FIELD OF THE PIPE-EXTRUSION SYSTEM THEORY, TECHNOLOGY AND EQUIPMENT IMPROVEMENT

Kosmatsky Yaroslav Igorevich – Ph.D. (Eng.), Responsible for foreign economic activities at the Russian Research Institute of the Tube & Pipe Industries Open Joint Stock Company, Chelyabinsk, Russia. Phone/fax: +7 (351) 734-70-60. E-mail: kosmatski@rosniti.ru.

Abstract. This article presents an overview of advanced areas of research in the field of pipe-extrusion system theory, technology and equipment improvement. The article introduces performance features of new energy-saving pipe-extrusion methods. Through the results of experimental studies using the laboratory and technical facilities of the drawing and extrusion laboratory of 'RosNITI' Joint Stock Company and the QForm 2D/3D final element simulation, the author shows the application efficiency of new pipe-extrusion methods and devices and the processes combined, a factor which is associated with the reduction of pipe-extrusion discard and reduction of maximum load and peak loads on deforming tools. The article presents an innovative approach to extrusion process improvement which ensures expansion of the hot-presset pipe assortment in the setting of running pipe extrusion systems and makes it possible to

manufacture internal helical fine pipes. The results of pipe-extrusion simulation with forced rotation of the mandrel have been analyzed, and the possibility and feasibility of its application are proposed.

At the same time, the author indicates valid geometrical dimensions of mandrels, if taken into account, ensuring production of pipe products of this type. The author provides a link to the software for engineering calculations of process power parameters and geometric parameters of pipe-extrusion tool profiling to produce internal helical fine pipes. In addition to consolidated results of research on direct pipe extrusion, the article presents a development of the technical and theoretical background for the lateral pipe extrusion process, but also when combined with casting, reducing and energy storage principles. The potential of current and further research is demonstrated.

Keywords: Pipe extrusion process, maximum extrusion force, pipe-extrusion discard, accumulating device, pipe with inner ribbing surface (IRS), combined methods and extrusion apparatus, import substitution.

References

1. Kosmatsky Ya.I. Improvement of a process of discard inertia pressing-out. *Materialy 65-j nauchnoj konferentsii. Seksii tekhnicheskikh nauk* [Proceedings of the 65th Scientific Conference. Workshops on Technical Sciences]. Chelyabinsk: SUSU, 2013, vol. 2, pp. 11–14.
2. Kosmatsky Ya.I., Vydrin A.V., Barichko B.V., Fokin N.V. Modelling of a pipe extrusion process using a device for discard inertia pressing-out. *Stal* [Steel], 2014, no. 11, pp. 46–49.
3. Kosmatsky Ya.I., Vydrin A.V., Barichko B.V., Fokin N.V., Voshodov V.B. *Sposob pressovaniya polykh profilej i ustrojstvo dlya ego osushhestvleniya* [Method of pressing hollow profiles and a device for its realization]. Patent RF, no. 2535831, 2014.
4. Kosmatsky Ya.I., Perevozchikov D.V. Technological bases of the manufacturing process of hot-pressed tubes with internal ribbing. *Trudy mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsiiya «TRUBY-2014»: sbornik nauchnykh trudov* [Papers of the International Scientific and Technical Conference 'TUBES & PIPES-2014']. Chelyabinsk: ROSNITI JSC, 2014. 1 CD-ROM disk.
5. Kosmatsky, Ya.I., Perevozchikov D.V. Determination of geometrical parameters of tool profiling in the manufacture of pipes with internal screw thread by extrusion. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Metallurgiya»* [Bulletin of the South Ural State University. Metallurgy series]. 2014, vol. 14, no. 1, pp. 80–83. (in Russ.).
6. Kosmatsky Ya.I., Perevozchikov D.V. *Programmnyj kompleks dlya opredeleniya parametrov pressovaniya trub s vnutrennim vintobraznym orebreniem* [Software package to determine parameters of extrusion of pipes with inner ribbing surface]. Patent RF, no. 2014616235, 2014.
7. Berezhnoi V.L., Sherba V.N., Baturin A.I. *Pressovanie s aktivnym dejstviem sil treniya* [Extrusion with dynamic actions of friction forces]. Moscow: Metallirgiya, 1988. 296 p.
8. Kosmatskiy Ya.I., Vydrin A.V., Khramkov E.V. *Ustrojstvo dlya polucheniya polykh profilej* [Device for producing hollow profiles]. Patent RF, no. 143437, 2014.
9. Kosmatskiy Ya.I., Khramkov E.V., Fokin N.V. *Ustrojstvo dlya polucheniya polykh profilej* [Device for producing hollow profiles]. Patent RF, no. 144990, 2014.
10. Kosmatsky Ya.I., Fokin N.V. Mathematical simulation of the combined process of casting and lateral pressing. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Metallurgiya»* [Bulletin of South Ural State University. Metallurgy series]. 2015, vol. 15, no. 1, pp. 29–32.
11. Kosmatsky Ya.I., Fokin N.V. Experimental study of inertial pipe extrusion. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Metallurgiya»* [Bulletin of the South Ural State University. Metallurgy series]. 2014, vol. 14, no. 2, pp. 73–77. (in Russ.).
12. Russian Federation. D.V. Manturov, the Minister of Industry and Trade. Decree No. 652 of March 31, 2015 [Text] (approval of the plan of measures on import substitution in the steel industry of the Russian Federation). Moscow, 2015. 4 p.
13. Russian Federation. D.V. Manturov, the Minister of Industry and Trade. Decree No. 651 of March 31, 2015 [Text] (approval of the plan of measures on import substitution in non-ferrous metallurgy of the Russian Federation). Moscow, 2015. 4 p.

Космацкий Я.И. Основные направления исследований в области совершенствования теории, технологии и оборудования трубопрессовых систем // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14. №1. С. 41–46. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-1-41-46

Kosmatsky Ya.I. Main directions of research in the field of the pipe-extrusion system theory, technology and equipment improvment. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 1, pp. 41–46. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-1-41-46

УДК 621. 771: 669. 716

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-1-46-52

МЕТОДОЛОГИЯ МОДЕРНИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ ГОРЯЧЕЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ МЕТОДОМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Константинов И.Л., Губанов И. Ю., Клеменкова Д.В, Астрашабов И.О., Сидельников С.Б., Горохов Ю.В.

Сибирский федеральный университет (СФУ), Красноярск, Россия

Аннотация. Разработана методология модернизации технологии горячей объемной штамповки поковок из алюминиевых сплавов компьютерным моделированием. Реализация методологии показана на действующей технологии штамповки поковки «Диск» из сплава АВ. При этом ставилось условие, что модернизация должна обеспечить повышение экономичности процесса и не сопровождаться заменой оборудования, существенной переделкой прессового инструмента, а также изменением формы и размеров штампованной поковки. Анализ технологии-аналога позволил сформулировать задачу сокращения количества переходов при штамповке путем оптимизации условий трения при штамповке и скоростных условий штамповки. После анализа по чертежам в программе SolidWorks создавали трехмерные модели штампованной поковки и штампа, которые загружали в препроцессор компьютерной программы DEFORM-3D в виде файлов. После этого вводили температурные, скоростные и силовые режимы деформирования, которые согласно параметрам заводского технологического процесса составляли: температура нагрева штампа 360–450°C, температура нагрева заготовок 400–470°C, скорость штамповки 2–10 мм/с, а сопротивление деформации бралось из литературы. На выходе получали базу данных процесса штамповки. В результате установили, что равномерное заполнение гравюры штампа за один переход достигается при показателе трения по верхней торцевой и боковым поверхностям составляющим 0,3–0,4, а скорость рабочего хода пресса при этом не должна превышать 5 мм/с.

© Константинов И.Л., Губанов И. Ю., Клеменкова Д.В, Астрашабов И.О., Сидельников С.Б., Горохов Ю.В., 2016

Возможности программы позволили также изучить течение металла и проследить заполнение штампа с привязкой к изменению усилия штамповки на разных этапах. В результате штамповки по новой технологии в производственных условиях за один переход были получены поковки, геометрия и свойства которых удовлетворяли требованиям нормативных документов при уменьшении себестоимости поковок не менее чем на 10%.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, горячая объемная штамповка, компьютерное моделирование, штампованная поковка.

Введение

На ряде предприятий до сих пор применяют технологии горячей объемной штамповки алюминиевых сплавов, которые были разработаны несколько десятков лет назад и требуют модернизации. Использование таких технологий объясняется тем, что они оснащены штамповым инструментом, оборудованием, накоплен производственный опыт их реализации, а разработка новых технологий, их опробование и внедрение требуют значительных затрат, поэтому модернизация используемых технологий взамен разработки новых может быть экономически выгодной.

Эффективным инструментом для анализа процессов обработки металлов давлением служит компьютерное моделирование, а для моделирования горячей объемной штамповки часто используют программные комплексы QFORM (Россия) и DEFORM (США), основанные на методе конечных элементов (МКЭ). В ряде работ показано [1–10], что применение компьютерного моделирования позволяет виртуально проследить картину деформирования металла, найти границы изменения энергосиловых параметров процесса штамповки, проиллюстрировать распределение напряжений и деформаций по объему деформируемого металла, определить причины брака получаемой продукции и т.д. При этом адекватность результатов моделирования в основном зависит от правильности выбора, а также полноты и точности вводимых граничных условий. Поэтому моделирование при разработке технологических процессов горячей объемной штамповки актуально, т.к. способно снизить затраты на модернизацию технологий и подтвердить их экономическую целесообразность. При этом важным является соблюдение определенного порядка проведения работ по совершенствованию технологий, поэтому целью работы являлась разработка методологии модернизации технологических процессов горячей объемной штамповки поковок из алюминиевых сплавов для повышения их экономической эффективности на основе компьютерного моделирования.

Для достижения цели в работе решались следующие задачи:

- разработать порядок построения компьютерной модели типового технологического процесса горячей объемной штамповки алюминиевых сплавов;

- в качестве примера построить компьютерную модель технологии горячей объемной штамповки одной из поковок, входящих в номенклатуру действующего предприятия;

- выполнить сравнительный анализ производственной и виртуальной технологий;

- разработать рекомендации по модернизации действующего производственного процесса;

- провести опытно-промышленное опробование технологии с учетом модернизации.

Моделирование технологии горячей объемной штамповки

Для достижения поставленной цели исследования проводили в последовательности, представленной на **рис. 1**.

Отправным моментом для компьютерного моделирования технологического процесса горячей объемной штамповки поковок из алюминиевых сплавов является подробное изучение и анализ используемой технологии (технология-аналог) одной из штампованных поковок, входящих в номенклатуру предприятия, включающее анализ исходных размеров и формы заготовки, изучение формоизменения заготовки по переходам штамповки, термомодеформационных параметров штамповки, условий трения, конструкции штампового инструмента и пр. Здесь же анализируются такие показатели, как производительность процесса, выход годного, коэффициент использования металла и др. Итогом проведенного анализа следует считать определение тех параметров процесса, управление которыми в данной технологии позволит повысить ее экономическую эффективность, например изменение формы и размеров заготовки, снижение количества переходов, выбор оптимальной температуры нагрева заготовки и штампа, подбор смазки, уточнение скоростных параметров штамповки и т.д. При этом следует обратить особое внимание на то, что такие граничные условия, как скорость деформирования, температуры нагрева заготовки и штампа и другие должны отражать возможности уже используемого деформирующего оборудования и соответствовать нормативным документам (отраслевым стандартам, требованиям заказчика и др.). На основе проведенного анализа разрабатывается структура компьютерной (виртуальной) модели технологического процесса, в которую входят такие компоненты технологии, как вид заготовки и температура ее нагрева, тип штампового инструмента и деформирующего оборудования, скоростные условия штамповки и т.д.



Рис. 1. Порядок моделирования горячей объемной штамповки поковок из алюминиевых сплавов

После этого в программе SolidWorks создается трехмерная модель заготовки и штампового инструмента, которая в виде файлов импортируется в программный комплекс, в данном случае использовался комплекс DEFORM-3D.

Следующим шагом является ввод в программу основных параметров моделирования (граничных условий) в соответствии с ограничениями, накладываемыми нормативными документами: температуры нагрева заготовки и штампа, скорости деформирования, показателя трения, реологических свойств материала и т.д. После этого включается расчет виртуального технологического процесса. В процессе расчета анализируется процесс штамповки, а именно характер формоизменения заготовки, например с учетом эффективности заполнения сложных элементов поковки (ребер, углов, бобышек и т.д.), распределение температуры, напряжений и деформаций по объему заготовки и т.д.

В процессе эксперимента некоторые параметры могут выходить за допустимые пределы. Например, в отдельных объемах заготовки температура может выйти за пределы допустимого интервала, что связано с деформационным разогревом, действием трения и т.д., и это способно вызвать перегрев или пережог. Отклонение по уровню допустимых напряжений опасно с точки зрения появления дефектов в микрообъемах заготовки и т.д. При резком росте усилия деформирования, например на стадии доштамповки или при заполнении сложных элементов формы поковки, растет вероятность разрушения штампа или выхода из строя оборудования. При возникновении описанных или других подобных случаев расчет останавливают, граничные условия подвергают корректировке и процесс запускают вновь. Виртуальный эксперимент считают законченным, если достигнуто полное оформление поковки, а в про-

цессе штамповки температура и напряжение не выходили за пределы допустимых интервалов.

По завершении виртуального эксперимента проводят сравнительный анализ двух технологий, выявляют экономические преимущества виртуальной технологии и разрабатывают рекомендации по корректировке действующей технологии. При этом параметры деформирования допускается изменять только в интервалах, регламентированных нормативными документами, например, понизить температуру нагрева заготовки, повысить скорость деформирования (если это технически осуществимо на используемом оборудовании). Можно использовать другие виды смазки и тем самым варьировать величиной показателя трения на разных участках поверхности заготовки. В отдельных случаях, по согласованию с заказчиком, можно изменить радиусы закруглений в местах гравюры штампа, обеспечивающих оформление сложных элементов формы поковки. Заключительным этапом процедуры модернизации является опытно-промышленное опробование технологии-аналога с учетом его корректировки и оценка экономической эффективности модернизации.

Результаты исследования и их обсуждение

В данной работе в качестве технологического процесса-аналога была выбрана технология штамповки поковки «Диск» из алюминиевого сплава АВ (рис. 2). При этом должно было выполняться условие, что модернизация данной технологии должна обеспечить повышение экономичности технологического процесса и не сопровождаться заменой используемого деформирующего оборудования, существенной переделкой применяемого прессового инструмента, а также изменением формы и размеров штампованной поковки.



Рис. 2. Штампованная поковка «Диск» из сплава АВ

Технология-аналог заключается в следующем. Исходным материалом для штамповки служит горячепрессованная заготовка круглого сечения. Для штамповки применяют вертикальный гидравлический пресс усилием 100 МН и разъемный штамп. Несмотря на использование одного штампа, штамповку осуществляют фактически в три, по сути, предварительную штамповку и, наконец, за третий рабочий ход выполняют окончательную штамповку (доштамповку).

Анализ описанной технологии, проведенный с учетом перечисленных выше ограничений, касающихся сохранения оборудования и инструмента, позволил сформулировать задачу по изысканию возможности сокращения количества переходов при штамповке. В связи с тем, что штамповку проводят в одном штампе, было предположено, что сокращения количества переходов можно достичь за счет определения оптимальных условий трения при штамповке и корректировки скорости штамповки.

Последовательность моделирования технологического процесса заключалась в следующем. После анализа действующей технологии по чертежам с помощью программы SolidWorks

создавали трехмерные модели штампованной поковки «Диск» и штампа (рис. 3), которые затем загружали в препроцессор компьютерной вычислительной системы в виде файлов. После этого вводили температурные, скоростные и силовые режимы деформирования, которые согласно параметрам заводского технологического процесса составляли: температура нагрева штампа 360–450°C, температура нагрева заготовок 400–470°C, скорость штамповки 2–10 мм/с, а сопротивление деформации для перечисленных значений брались из [11]. На выходе получали базу данных процесса штамповки.

С учетом накладываемых ограничений, не позволяющих менять штамповую оснастку и температурно-скоростные параметры деформирования, были проведены исследования по влиянию показателя трения по Зибелю на эффективность заполнения штампа при штамповке. В производстве (технология-аналог) для нижней торцевой поверхности используют смазку, представляющую порошок графита с небольшим содержанием масла «Вапор-Т», которая обеспечивает показатель трения около 0,7. Эту величину показателя трения для нижней торцевой поверхности применяли и при моделировании. Поставив задачу добиться оформления поковки за один переход, проводились эксперименты при различных показателях трения по боковой и верхней торцевой поверхностям, варьируя их в интервале от 0,2 до 0,5. При этом скорость рабочего хода пресса изменяли от 3 до 5 мм/с. В результате установили, что равномерное заполнение гравюры штампа за один переход достигается при показателе трения по верхней торцевой и боковым поверхностям составляющим 0,3–0,4, а скорость рабочего хода пресса при этом не должна превышать 5 мм/с.

Возможности программы позволили также изучить течение материала и проследить заполнение штампа металлом с привязкой к изменению усилия штамповки на разных этапах (рис. 4).

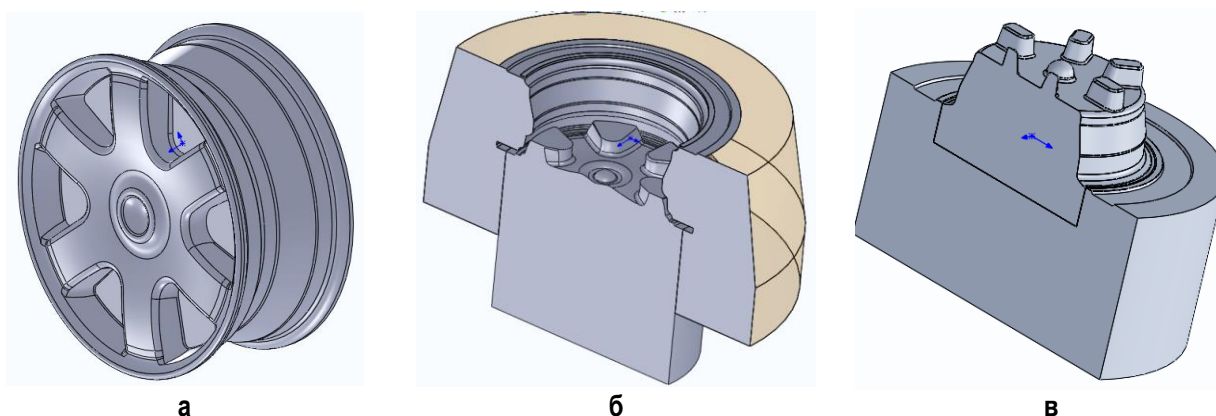


Рис. 3. Трехмерные модели поковки «Диск» (а) и деталей штампа (б, в)

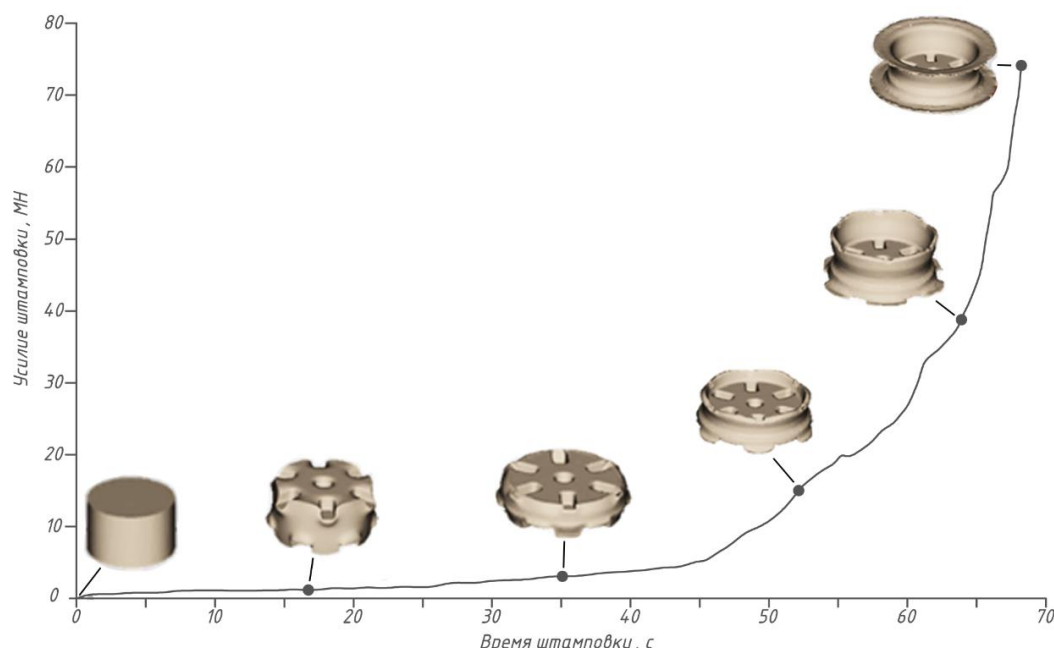


Рис. 4. Изменение усилия штамповки и формы заготовки при виртуальном эксперименте

Таким образом, компьютерное моделирование позволило обосновать изменения в технологическом процессе-аналоге. В результате штамповки по новой технологии в производственных условиях за один переход были получены поковки, геометрия и свойства которых удовлетворяли требованиям нормативных документов при уменьшении себестоимости поковок не менее чем на 10%.

Заключение

По результатам исследований была разработана методология модернизации технологических процессов горячей объемной штамповки поковок из алюминиевых сплавов для повышения их экономической эффективности на основе компьютерного моделирования с использованием программного комплекса DEFORM-3D. Опробование методологии на примере действующей технологии получения штампованной поковки «Диск» из алюминиевого сплава АВ показало, что корректировка технологического процесса штамповки может быть произведена без изменения используемого оборудования и применяемой штамповой оснастки в данном случае за счет регламентации условий трения и скорости штамповки. В результате модернизации повышается экономическая эффективность процесса.

Список литературы

1. Элингхаузен Т., Стебунев С.А. QForm 7 – новое слово в моделировании процессов обработки металлов давлением // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2014. №2. С. 31–34.

2. Лисунец Н.Л., Соломонов К.Н., Цепин М.А. Объемная штамповка алюминиевых заготовок. М.: Машиностроение, 2009. 171 с.
3. Кононов В.В., Егорова Л.И. Новые возможности в области моделирования процессов штамповки // Кузнечно-штамповочное производство. 2000. № 7. С. 35–38.
4. Оптимизация процесса горячей объемной штамповки путем моделирования в программном комплексе QFORM / Шмаков А.К., Колесников А.В. Максименко Н.В., Станиславчик А.С. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2013. №4. С. 28–31.
5. Вакалов А. А. Применение компьютерного моделирования при разработке процессов горячей штамповки поковки лопаток // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2012. № 1. С. 36–41.
6. Константинов И.Л., Губанов И.Ю., Горохов Ю.В. Компьютерное моделирование технологического процесса изотермической штамповки сложнопрофильных панелей из алюминиевых сплавов // Изв. вузов. Цветная металлургия. 2013. №2. С. 46–50.
7. Моделирование процесса горячей объемной штамповки поковки из алюминиевого сплава АК6 / Константинов И.Л., Губанов И.Ю., Астрабабов И.О., Сидельников С.Б., Белан Н.А. // Изв. вузов. Цветная металлургия. 2015. № 1. С. 45–48.
8. Константинов Д.В., Корчунов А.Г. Мультимасштабное компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. № 1. С. 36–43.
9. Кинзин Д.И., Рачков С.С. Использование программного комплекса DEFORM-3D при моделировании процессов сортовой прокатки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. №2. С. 45–49.
10. Реологические модели как основной элемент моделирования процессов обработки металлов давлением / Смирнов О.М., Тулупов С.А., Цепин М.А., Лисунец Н.Л., Бегнарский В.В., Нгуен Чыонг Ан // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2008. №3. С. 45–52.
11. Микляев П.Г., Дуденков В.М. Сопротивление деформации и пластичность алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1973, 183 с.

Материал поступил в редакцию 22.10.15.

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-1-46-52

COMPUTER-SIMULATED UPGRADING PROCEDURES OF THE HOT ALUMINUM-ALLOY FORGING PROCESS TECHNOLOGY

Konstantinov Igor Lazarevich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: ilcon@mail.ru.

Gubanov Ivan Yurievich – Ph.D. (Eng.), Assistant Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: vakal_@mail.ru.

Klemenkova Diana Vladimirovna – Graduate Student, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: dianaklemenkova@gmail.com.

Astrashabov Igor Olegovich – Postgraduate Student, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: iastrashabov@mail.ru.

Sidelnikov Sergey Borisovich – D.Sc. (Eng.), Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: sbs270359@yandex.ru.

Gorokhov Yuriy Vasilievich – D.Sc. (Eng.), Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: 160949@list.ru.

Abstract. On the basis of computer simulation, upgrading procedures of hot aluminum-alloy forging process technology have been developed to improve the cost effectiveness of forged parts. This article outlines the following patterns of upgrading: the analysis of a parallel process, development of the virtual process structure, SolidWorks-based design of forging and die models, computer simulation formulation, simulation parameter setting, start-up and analysis of the process computational model, analysis of the virtual process technology, and formulation of recommendations on upgrading of the existing process followed by pilot testing of the process technology. The process technology of forming “Disc” forgings from AB aluminum alloy exemplifies the parallel process. It was specified that upgrading should improve the process cost effectiveness and skip replacement of the deforming equipment in the use and extensive modification of pressing tools as well as changes in forging shape and sizes. The analysis of the parallel process technology has made it possible to formulate a problem of finding a possibility to reduce the number of transitions during forming by improving forming friction conditions and forming velocity conditions. After the analysis, 3D models of forgings and dies were designed according to the drawings with the aid of the SolidWorks software. The models were file-uploaded into the DEFORM-3D preprocessor program. From here on, according to the factory process specifications, the temperature, speed and power conditions of deformation were set as follows: die heating temperature 360–450°C, billet heating temperature 400–470°C, forming speed 2–10 mm/s. The strain resistance value, however, was borrowed from the literature. A forming process database was obtained in the output. As a result, we found out that a uniform die cavity fill for one transition can be achieved at upper-end and lateral friction coefficients of 0.3–0.4, with the press stroke speed no more than 5 mm/s. The software features also enabled the study of the metal flow and to follow the die fill with reference to the change in the forming force at different stages. Using new process technologies, one transition of on-plant forming resulted in forgings with the shape and properties complying with the regulatory requirements with reduction on the cost of forgings of no less than 10%.

Keywords: Aluminum alloys, hot forging, computer simulation, forgings.

References

1. Erlinghausen T., Stepanov S.A. QForm 7 - A new dawn of metal forming simulation. *Kuznechno-shtampovoye proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem* [Forging and stamping production. Metal forming]. 2014, no. 2, pp. 31–34.
2. Lisunets N.L., Solomonov K.N., Tsepin M.A. *Ob'emnaya shtampovka alyuminiyevykh zagotovok* [Forging of aluminum billets]. Moscow: Mashinostroyeniye, 2009, 171 p.
3. Kononov V.V., Egorova L.I. New features in stamping modeling. *Kuznechno-shtampovoye proizvodstvo* [Forging and stamping production]. 2000, no. 7, pp. 35–38.
4. Shmakov A.K., Kolesnikov A.V., Maksimenko N.V., Stanislavchik A.S. Optimization of hot forging with the aid of the QFORM simulation. *Kuznechno-shtampovoye proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem* [Forging and stamping production. Metals forming]. 2013, no. 4, pp. 28–31.
5. Vakalov A.A. Computer simulation to design hot forging of blade forgings. *Kuznechno-shtampovoye proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem* [Forging and stamping production. Metals forming]. 2012, no. 1, pp. 36–41.
6. Konstantinov I.L., Gubanov I.Yu., Gorokhov Yu.V. Computer modeling of isothermal forging of aluminum- alloy geometrically-complex panels. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya* [Izv. vuzov. Tsvetnaya metallurgiya]. 2013, no. 2, pp. 46–50.
7. Konstantinov I.L., Gubanov I.Yu., Astrashabov I.O., Sidelnikov S.B., Belan N.A. Modeling of hot forging of AK6 aluminum alloy forgings. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya* [Izv. vuzov. Tsvetnaya metallurgiya]. 2015, no. 1, pp. 45–48.
8. Konstantinov D.V., Korchunov A.G. Multiscale computer simulation of metal forming processes. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 1, pp. 36–43.
9. Kinzin D.I., Rachkov S.S. DEFORM-3D software package to simulate shape rolling. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2011, no. 2, pp. 45–49.

10. Smirnov O.M., Tulupov S.A., Tsepin M.A., Lisunets N.L., Begnarsky V.V., Nguyen Truong An. Rheologic models as a core element of metal forming simulation. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2008, no. 3, pp. 45–52.
11. Miklyaev P.G., Dudenkov V.M. *Soprotivlenie deformatsii i plastichnost' alyuminiyevykh splavov* [Deformation resistance and formability of aluminum alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1973, 183 p.

Методология модернизации технологии горячей объемной штамповки алюминиевых сплавов методом компьютерного моделирования / Константинов И.Л., Губанов И. Ю., Клеменкова Д.В., Астрашабов И.О., Сидельников С.Б., Горохов Ю.В. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2016. Т. 14. №1. С. 46–52. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-1-46-52

Konstantinov I.L., Gubanov I.Yu., Klemenkova D.V., Astrashabov I.O., Sidelnikov S.B., Gorokhov Yu.V. Computer-simulated upgrading procedures of the hot aluminum-alloy forging process technology. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 1, pp. 46–52. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-1-46-52

УДК 621.771

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-1-52-59

РАЗРАБОТКА ИМПОРТОЗАМЕЩАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ДЮБЕЛЬ-ГВОЗДЕЙ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ*

Бирюков М.А.¹, Песин А.М.², Чукин М.В.², Картунов А.Д.³, Бакшинов В.А.³, Бирюков А.В.³

¹ ОАО «ММК», Магнитогорск, Россия

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

³ ОАО «ММК-Метиз», Магнитогорск, Россия

Аннотация. В работе рассмотрены вопросы совершенствования технологии получения баллистического острия дюбель-гвоздей на основе математического моделирования и разработки новых конструкций инструмента и изделий новой формы. Найдены рациональные параметры инструмента для производства дюбелей с рифленой поверхностью стержня. Представлены распределения интенсивностей скоростей деформации, а также нормальные напряжения в поперечных сечениях острия накачиваемого дюбеля по длине очага деформации для незавершенного процесса прокатки. Получено изменение усилий инструмента при накатке дюбеля в направлении вертикальной оси по длине деформирующей зоны. Характер изменения усилий от времени на обеих плашках говорит о равномерности процесса острения заготовки. Проведены опытно-промышленные эксперименты по производству дюбелей с гладкой поверхностью стержня, выведены рациональные параметры инструмента для поперечно-клиновой прокатки. Показана возможность импортозамещения строительных распорных дюбелей (анкеров), конструкции которых основаны на фиксации изделия в заранее просверленном отверстии в бетонной конструкции. Рассмотрена схема и предложена новая конструкция инструмента ролик – сегмент. Инструмент предназначен для одновременного накачивания резьбы и профилирования поверхности. Конструкция состоит из ролика и сегмента, каждый из которых выполнен в виде резьбовой и профилирующей поверхности. Новизна конструкции заключается в том, что профилирующая поверхность ролика выполнена с несколькими, а профилирующая поверхность сегмента с одной рабочими частями, включающими изготовленные эксцентрично оси инструмента заборную и деформирующую зоны, а также изготовленную соосно оси инструмента калибрующую зону, с профилем, повторяющим контур готового изделия. Применение инструмента ролик-сегмент также позволяет повысить производительность процесса острения дюбель-гвоздей в сравнении с накаткой плоскими плитами. Поданы 4 заявки на полезные модели.

Ключевые слова: импортозамещение, дюбель, моделирование, программный комплекс «DEFORM 3D», поперечно-клиновая прокатка, монтажные пистолеты.

Введение

Адаптация предприятия к условиям современного рынка определяет его конкурентоспособность. Используемое оборудование и применяемый технологический процесс унифицированы и защищены авторскими свидетельствами.

* Статья по материалам доклада на международной молодежной научно-технической конференции «Инновационные процессы обработки металлов давлением: фундаментальные вопросы связи науки и производства», состоявшейся 15–17 июня 2015 г. в ФГБОУ ВПО «МГТУ» (г. Магнитогорск) при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект РФФИ № 15-38-10185).
© Бирюков М.А., Песин А.М., Чукин М.В., Картунов А.Д., Бакшинов В.А., Бирюков А.В., 2016

ствами. Сегодня, в частности, на рынке метизной продукции имеются тысячи различных видов изделий, в том числе поставляемые из-за рубежа, не имеющие аналогов российского производства. Очевидно, что на стоимость продукции иностранных фирм оказывают влияние транспортные операции, изменения курсов валют, что должно положительно сказываться на реализации продукции российского производства на внутреннем рынке. Таким образом, на сегодняшний день у российских производителей появилась возможность импортозамещения отдельных видов крепежа, в част-

ности дюбель-гвоздей (дюбелей), распорных дюбелей (анкеров) с использованием существующего оборудования ОАО «ММК-Метиз».

Анализ и сравнение способов получения баллистического острия дюбель-гвоздей

В настоящее время широкое развитие в строительстве получила технология прямого монтажа (ТПМ) строительных конструкций к бетонным, железобетонным основаниям, кирпичу, конструкционной стали (с пределом текучести до 450 МПа) без предварительного засверливания и подключения к энергоисточникам. Таким образом, ТПМ является высокоэффективным решением множества задач – от крепления ограждений и опалубки до монтажа профилей и реек, подвесных систем и инженерных коммуникаций. Технология прямого монтажа позволяет поднять производительность при креплении строительных узлов и деталей. При применении автоматических монтажных пистолетов скорость крепления увеличивается до 700 точек в час [1]. Основным элементом данной технологии является развитие и совершенствование конструкции монтажных пистолетов различного назначения мощности и производительности. Расширяется присутствие на рынке ведущих мировых производителей монтажных пистолетов – «Trusty» (Тайвань), TOUA (Китай), «SPIT» (Франция).

Основной объем дюбелей для ручной забивки, а также для забивки при помощи поршневых пороховых монтажных пистолетов неавтоматического действия в России на сегодняшний день производится на предприятии ОАО «ММК-Метиз». Широкое развитие на рынке получают клеенные в обоймы дюбель-гвозди для автоматических пороховых пистолетов. На российском рынке дюбельной продукции присутствуют представители Китая, Германии, Тайваня, Америки. Наиболее развито производство дюбельной техники в Европе: «FISCHER» (Германия) и «HILTI» (Лихтенштейн), «TOX» (Германия), «KEW» (Германия).

В настоящий момент в ММК-Метиз производятся дюбеля методом поперечно-клиновой прокатки с рифлением стержня и шайбой, применяемые для пороховых монтажных пистолетов старой конструкции (типа ПЦ-84, снимаемых с производства). Технологическая цепочка производства дюбель-гвоздей в ОАО «ММК-Метиз» включает в себя операции волочения проволоки, термообработки, высадки и редуци-

рования концевой части изделия, процесс острения заготовки, термическое упрочнение (для достижения необходимого уровня механических свойств), нанесение защитных покрытий, насадка шайбы.

Иностранцами производителями используются следующие способы получения баллистического острия дюбель-гвоздей [2]: ротационная ковка и фрезерование. Их отличительные черты:

- низкая производительность (до 50–60 изделий в минуту);
- высокий износ и стоимость инструмента;
- длинная технологическая цепочка (для получения баллистического острия требуется несколько единиц оборудования).

Как следствие, высокая себестоимость процесса острения.

Что касается предприятия ММК-Метиз, то изначально здесь применялись механические способы формирования острия дюбеля – фрезерование на автомате 6290ДМ. Данные операции характеризуются следующими отличительными чертами:

- низкая производительность;
- высокая стоимость инструмента;
- разогрев инструмента может привести к поломкам и простоям.

Сегодня для производства дюбелей используется более производительный процесс поперечно-клиновой прокатки. Инструмент, а также оборудование (автомат-комбайн А1918М) показаны на **рис. 1**.

По сравнению с вышеизложенными процессами, поперечно-клиновая прокатка имеет ряд преимуществ:

- производительность – фактически можно получать до 140 дюбелей в минуту;
- ресурсосбережение (коэффициент использования металла близок к единице, малый состав оборудования – сокращение трудоемкости последующих операций);
- благоприятное напряженно-деформированное состояние при накатке острия дюбеля, что особенно актуально для конструкционных сталей типа стали 70, из которой и производят высококачественную дюбельную продукцию;
- высокая стойкость инструмента;
- высокая точность изготовления острия по сравнению с другими способами производства;
- высокая рентабельность изделия за счет низкой себестоимости;
- снижение капитальных затрат на ремонт и обслуживание.



Рис. 1. Инструмент и оборудование для накатки баллистического острия дюбеля

Таким образом, сопоставляя разные способы производства дюбелей, можно сделать вывод о том, что наиболее рациональным и производительным процессом является поперечно-клиновое прокатание.

Как было отмечено ранее, широкое развитие на рынке получают склеенные в обоймы дюбель-гвозди для автоматических пороховых пистолетов. В то же время для импортозамещения необходимо освоение производства дюбелей типа «Coil nails» по бетону для пневматических пистолетов. Применение данных типов пистолетов существенно упрощает монтажные работы, снижает себестоимость строительных работ. Освоение гладких (для улучшения входимости в бетон) дюбелей методом поперечно – клиновой прокатки позволит существенно расширить рынок сбыта, организовать производство импортозамещающих видов продукции. Широко применяются в строительстве распорные дюбеля (анкера), конструкция которых основана на фиксации изделия в заранее просверленном отверстии в бетонной конструкции за счёт распора металлической трубки (обечайки) на конусной части изделия при его извлечении из отверстия. На текущий момент основная доля поставок таких изделий на наш рынок осуществляется иностранными фирмами. Встает вопрос импортозамещения. В настоящий момент проведен анализ суще-

ствующих способов производства таких изделий, идет подбор материалов для оценки процесса прокатки на существующем оборудовании ОАО «ММК-Метиз», планируется постановка опытно-промышленных экспериментов, поданы 4 заявки на патенты РФ.

Создание и исследование математической модели поперечно-клиновой прокатки

Фундаментальные основы процесса получения баллистического острия методом поперечно-клиновой прокатки были разработаны коллективом ученых: Манин В.П., Поварич В.В. и др [3]. В дальнейшем конструкция деформирующего клина была усовершенствована в работе Бирюкова А.В., Центнера Г.А. и др [4]. Сегодня совершенствование инструмента для поперечно-клиновой прокатки предлагается осуществлять с применением программы «DEFORM 3D» для расчёта напряжённо-деформированного состояния металла в очаге деформации при прокатке заготовки деформирующими клиньями.

Таким образом, целью данного исследования является совершенствование технологии получения баллистического острия дюбель-гвоздей на основе математического моделирования и разработки новых технических решений в области поперечно-клиновой прокатки, а

также разработка импортозамещающих видов изделий при применении существующего оборудования ОАО «ММК-Метиз».

Задачи исследования:

1. Анализ известных подходов к моделированию и производству дюбелей.
2. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при поперечно-клиновой прокатке дюбелей с рифленой и гладкой поверхностями.
3. Разработка новых технических решений с целью производства импортозамещающих видов крепежа (дюбель-гвоздь типа «СН», распорный дюбель).

Для решения поставленных задач проводится моделирование процесса поперечной-клиновой прокатки в программном комплексе «DEFORM 3D» с целью нахождения рациональных параметров деформирующих поверхностей клина.

Исходная заготовка подается на заборную зону неподвижного инструмента (рис. 2, а, б). Движущейся (верхней) плашке сообщается поступательное движение со скоростью, соответствующей заранее рассчитанной производительности. Заходные части инструментов внедряются в заготовку с диаметрально проти-

воположных сторон, вызывают ее вращение. В результате на деформирующем участке производится постепенное профилирование заготовки инструментом (рис. 2, в). На заключительной стадии, на стыке деформирующей и калибрующей зон, осуществляется обрыв обсежки и дальнейшее калибрование острия изделия.

При моделировании были приняты следующие допущения:

1. Схема напряженно-деформированного состояния – трёхмерная.
2. Процесс является изотермическим (комнатная температура).
3. Инструмент несжимаемый (абсолютно жёсткий).
4. Деформируемая среда – жесткопластическая.
5. Деформируемый материал – однородный и изотропный во всём объёме.
6. Условие трения на контакте металла с инструментом определяется законом Кулона.
7. Коэффициент трения в очаге деформации постоянный, процесс осуществляется без использования смазывающей жидкости (в производственных условиях применяется масло промышленное И-20А или И-40А по ГОСТ 20799 [5]).

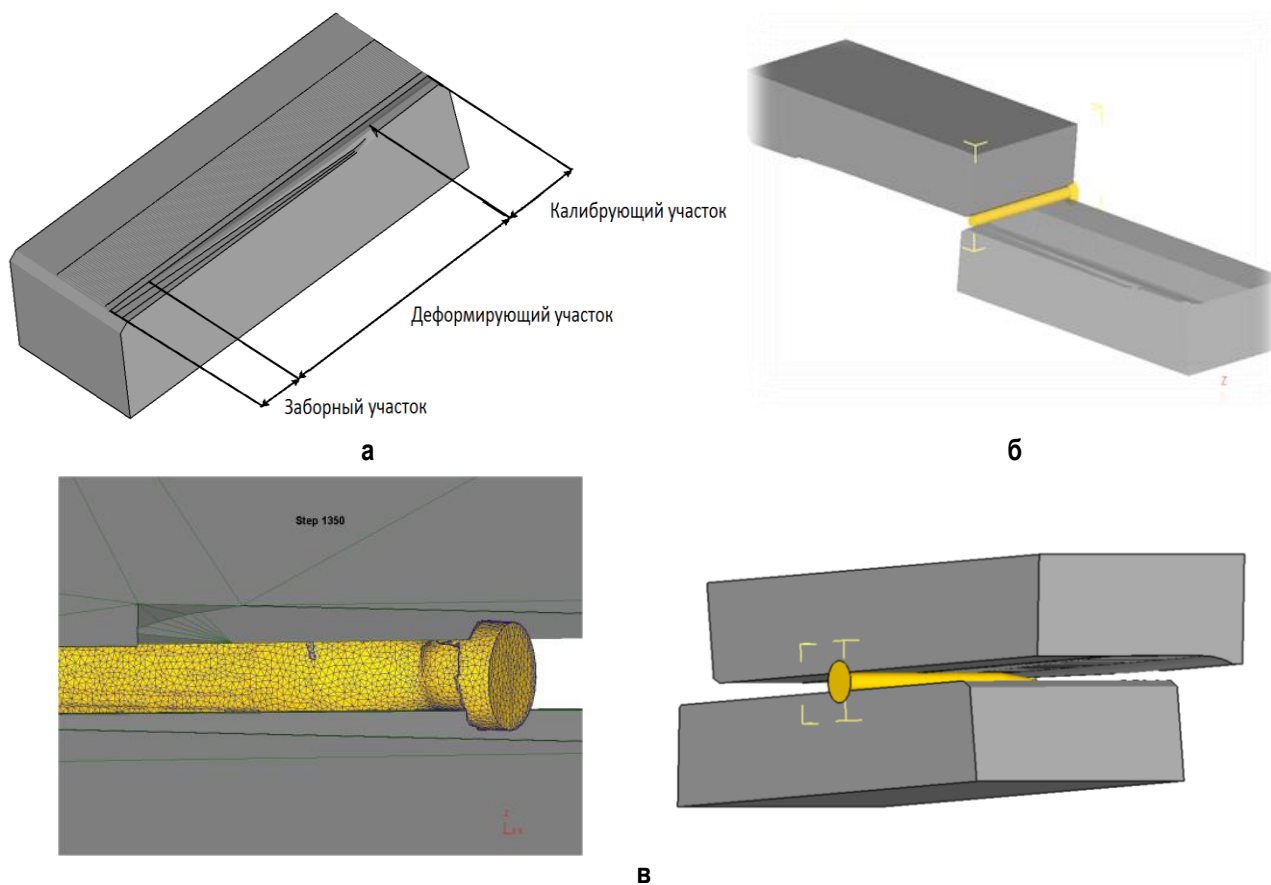


Рис. 2. Моделирование процесса поперечно – клиновой прокатки в программном комплексе «DEFORM 3D»

Численные расчеты проводятся для редуцированной заготовки диаметром 4,5 мм, длиной стержня 60 мм из стали марки AISI-1070 (американский аналог стали 70), начальный предел текучести которой составляет 750 МПа. Скорость инструмента задается в соответствии с производительностью автомата А1918М и соответствует 180 мм/с. Количество элементов в сетке задается различными величинами с целью адаптации модели для получения баллистического острия изделия и составляет от 100 до 150 тысяч. Все элементы были равномерно распределены по объему заготовки.

На **рис. 3, 4** представлены некоторые результаты расчета параметров напряженно-деформированного состояния. На этих распределениях последовательно (позиции А, Б, В) показаны поперечные сечения накатываемого дюбеля по длине очага деформации в соответствии со схемой, представленной на **рис. 5**. У каждого рисунка (позиция Г) представлена численная шкала, позволяющая

определить конкретные величины параметра в различных точках поперечного сечения профиля.

Следует отметить, что соответствующие распределения интенсивностей скоростей деформации, а также нормальных напряжений в поперечных сечениях накатываемого дюбеля по длине очага деформации приведены для незавершенного процесса накатки, когда удастся получить полное заполнение очага деформации без преждевременного обрыва обсечки, налипания элементов сетки заготовки на инструмент вследствие вариации для подбора рациональных параметров процесса накатки. Таким образом, осуществляется процесс адаптации модели к условиям текущего производства в соответствии с особенностями расчета напряженно-деформированного состояния в программном комплексе «DEFORM 3D».

На **рис. 6** представлено изменение усилия на накатываемом изделии при поперечно-клиновой прокатке в направлении вертикальной оси по длине деформирующей зоны.

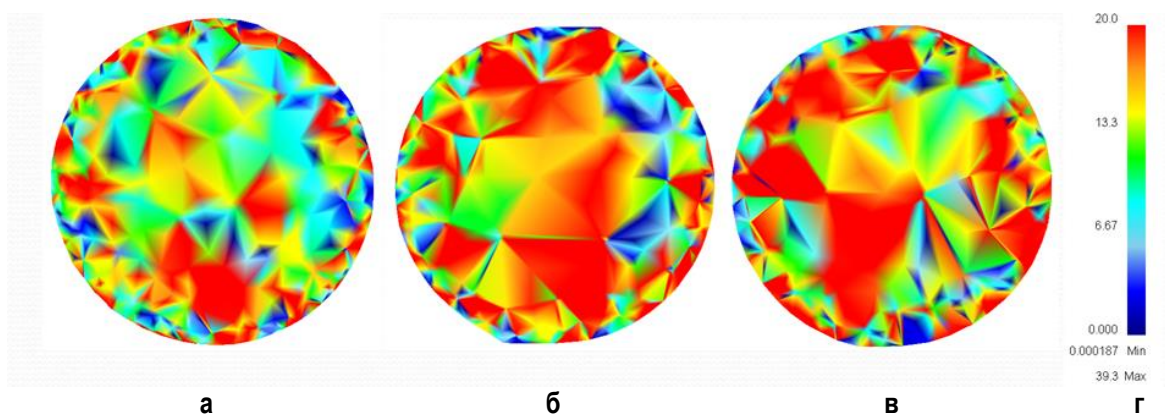


Рис. 3. Интенсивности скоростей деформации в поперечных сечениях накатываемого дюбеля по длине очага деформации при формировании баллистического острия способом поперечно-клиновой прокатки

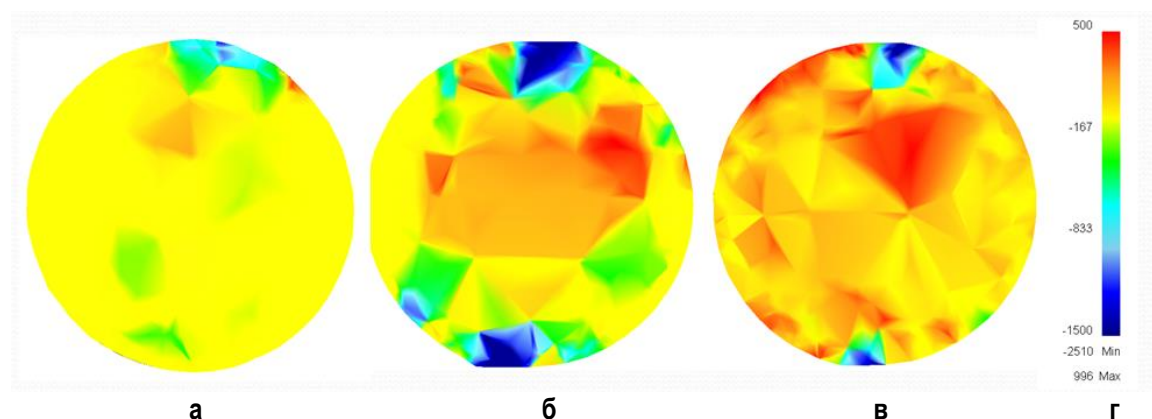


Рис. 4. Нормальные напряжения в поперечных сечениях накатываемого дюбеля по длине очага деформации в направлении продольной оси при формировании баллистического острия способом поперечно-клиновой прокатки

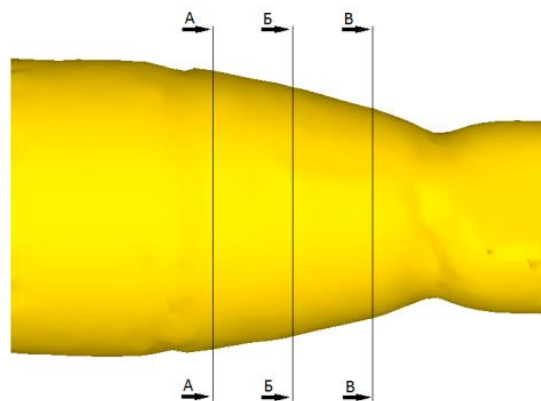


Рис. 5. Схема полученных поперечных сечений накатываемого дюбеля по длине очага деформации

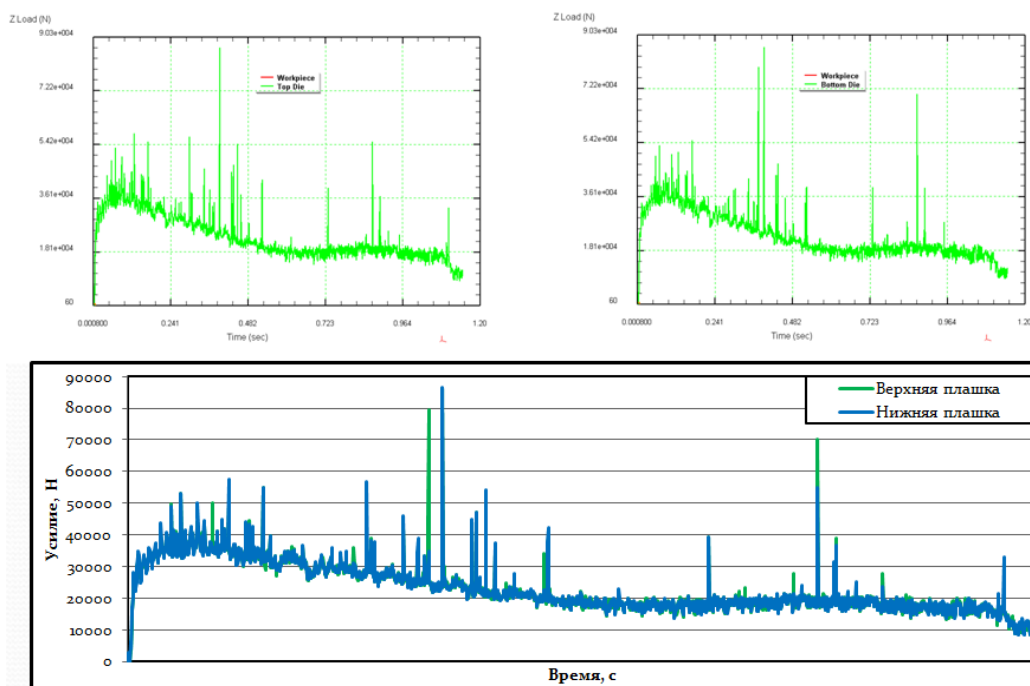


Рис. 6. Изменение усилия на накатываемом изделии при поперечно-клиновой прокатке в направлении вертикальной оси по длине деформирующей зоны

Характер изменения усилий от времени на обеих плашках выражен одинаково, о чем свидетельствует представленное распределение усилия. Наложение усилий, полученных на плашках, говорит о равномерности процесса острения заготовки. Также видна тенденция к снижению усилий, что говорит о перераспределении элементов сетки в обесечку и постепенном равномерном уменьшении диаметра изделия в очаге деформации. Среднее значение для обеих плашек составило 22,8 кН.

Заключение

Опытно-промышленным способом найдены рациональные параметры инструмента для производства дюбелей с рифленой поверхностью

стержня. Модернизировано существующее оборудование для выпуска дюбелей с гладкой поверхностью (тип «СН»).

Предлагаемые способы производства «СН»-дюбелей, используемых в полуавтоматических и автоматических монтажных пистолетах, а также распорного дюбеля, позволят получать импортозамещающие изделия высокого качества с фактической себестоимостью, практически равной себестоимости проволоки, из которой будет изготовлено изделие.

Поданы 4 заявки на полезные модели РФ [6–9]. Опытно-промышленные эксперименты показали адекватность разработанных математических моделей.

Список литературы

1. Технология прямого монтажа. URL: <http://vashdom.ru> (дата обращения: 22.01.2015).
2. Любвин В.И. Обработка металлов радиальным обжатием. М.: Машиностроение, 1975. 248 с.
3. Пат. 1337177 СССР, МПК В21Н 1/18. Способ поперечно-клиновой прокатки участков заострения дюбелей / Никифоров Б.А., Г.В. Бухиник, В.П. Манин, Я.С. Короткин, В.В. Поварич, С.М. Петрик, Е.С. Минеев, Б.М. Ригмант. Опубл. 15.09.1987. Бюл. №34.
4. Патент 1586835 СССР, МПК В21Н 1/18. Инструмент для поперечно-клиновой прокатки / А.В. Бирюков, Г.А. Центнер, О.М. Вальчук, Н.Н. Горин. Опубл. 23.08.1990. Бюл. №31.
5. Манин В.П., Пыхтунова С.В. Совершенствование процесса холодной поперечно-клиновой прокатки: монография. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2007. 103 с.
6. Заявка на полезную модель № 2015129882. Инструмент для поперечно-клиновой прокатки / Песин А.М., Чукин М.В., Картунов А.Д., Бахшинов В.А., Бирюков М.А., Бирюков А.В. Дата подачи заявки: 20.07.2015.
7. Заявка на полезную модель № 2015129964. Инструмент для поперечно-клиновой прокатки / Песин А.М., Чукин М.В., Картунов А.Д., Бахшинов В.А., Бирюков М.А., Бирюков А.В. Дата подачи заявки: 20.07.2015.
8. Заявка на полезную модель № 2015129966. Инструмент для прокатки изделия на ролике – сегменте / Песин А.М., Чукин М.В., Картунов А.Д., Бахшинов В.А., Бирюков М.А., Бирюков А.В. Дата подачи заявки: 20.07.2015.
9. Заявка на полезную модель № 2015129970. Распорный дюбель / Песин А.М., Чукин М.В., Картунов А.Д., Бахшинов В.А., Бирюков М.А., Бирюков А.В. Дата подачи заявки: 20.07.2015.

Материал поступил в редакцию 18.09.15.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-1-52-59

DEVELOPMENT OF AN IMPORT-SUBSTITUTING TECHNOLOGY OF DOWEL-NAILS PRODUCTION THE BASIS OF NUMERICAL MODELLING WITH THE FINITE-ELEMENT METHOD

Biryukov Maksim Aleksandrovich – Process Engineer, Magnitogorsk Iron and Steel Works Open Joint Stock Company, Magnitogorsk, Russia. E-mail: bigmax174@gmail.com.

Pesin Aleksandr Moiseevich – D.Sc. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: pesin@bk.ru.

Chukin Mikhail Vitalevich – D.Sc. (Eng.), Professor, First Vice Rector – Vice Rector for Research and Innovations, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Kartunov Andrey Dmitrievich – Chief Engineer, “MMK-METIZ” Open Joint Stock Company, Magnitogorsk, Russia.

Bakshinov Vadim Alekseevich – Head of Department, “MMK-METIZ” Open Joint Stock Company, Magnitogorsk, Russia.

Biryukov Aleksandr Viktorovich – Leading Specialist of “MMK-METIZ” Open Joint Stock Company, Magnitogorsk, Russia.

Abstract. This article considers the improvement of a technology of dowel-nail ballistic pointing on the basis of mathematical modeling and the development of new designs of a tool and products with new forms. Rational parameters of a tool used to produce dowels with a grooved rod have been found. The authors have shown the strain rate intensity distributions and normal stresses in cross-sections of a dowel point along the length of the deformation zone for an incomplete rolling process. Tool force variations at dowel knurling in the vertical axis line along the length of the deformation zone have been obtained. The manner of the force variations with time on both dies indicates the uniformity of the blank pointing process. Pilot production of dowels with a smooth surface of a rod has been carried out; rational parameters of a cross-wedge rolling tool have been derived. The authors have shown the possibility of import-substitution of constructional expanding dowels (anchor bolts) with their designs based on retention of an item in a pre-drilled hole in a concrete structure. A diagram has been studied and a new design of a roller-segmented-die tool has been proposed. The tool is designed for simultaneous thread-rolling and surfacing. The construction is made of a roller and a segmented die, each of the parts designed as a thread and shaping surface. The novelty

of this construction lies in the fact that a shaping surface of a roller is built with several operating parts while a shaping surface of a segmented die is built with one operating part. The operating parts include pick-up and deformation zones which are made eccentrically against the tool axis, as well as a gauging zone which is arranged in line with the tool axis with a profile following the contour of the end-product. The application of the roller-segmented-die tool also enhances improvement of dowel-nail pointing efficiency if compared with flat-plate knurling. Four applications for utility models have been submitted.

Keywords: Import-substitution, dowel, modeling, DEFORM 3D software package, cross-wedge rolling, dowel-driver.

References

1. Technology of direct installation. URL: <http://vashdom.ru> (an access date: 22.01.2015).
2. Lyubvin V.I. *Obrabotka metallov radial'nyim obzhatiem* [Metal forming by radial compression]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1975. 248 p.
3. Nikiforov B.A., Bukhinik G., Manin V.P., Korotkin Ya.S., Povaritch V.V., Petrik S.M., Mineev E.S., Rigmant B.M. *Sposob poperechno-klinovoy prokatki uchastkov zaostreniya dyubelej* [Cross-wedge rolling of dowel pointing areas]. Patent no. 1337177 USSR, 1987.

4. Biryukov A.V., Tsentner G.A., Valchuk O.M., Gorin N.N. *Instrument dlya poperechno-klinovoj prokatki* [Cross-wedge rolling tool]. Patent no. 1586835 USSR, 1990.
5. Manin V.P., Pykhtunova S.V. *Sovershenstvovanie protsessa kholodnoj poperechno-klinovoj prokatki: monografiya* [Improvement of cold cross-wedge rolling: Monograph]. Magnitogorsk: Novos Magnitogorsk State Technical University, 2007. 103 p.
6. Pesin A.M., Chukin M.V., Kartunov A.D., Bakshinov V.A., Biryukov M.A., Biryukov A.V. *Instrument dlya poperechno-klinovoj prokatki* [Cross-wedge rolling tool]. Utility model application no. 2015129882, 2015.
7. Pesin A.M., Chukin M.V., Kartunov A.D., Bakshinov V.A., Biryukov M.A., Biryukov A.V. *Instrument dlya poperechno-klinovoj prokatki* [Cross-wedge rolling tool]. Utility model application no. 2015129964, 2015.
8. Pesin A.M., Chukin M.V., Kartunov A.D., Bakshinov V.A., Biryukov M.A., Biryukov A.V. *Instrument dlya prokatki izdeliya na rolke – segmente* [An instrument for rolling the product on the roller-segment]. Utility model application no. 2015129966, 2015.
9. Pesin A.M., Chukin M.V., Kartunov A.D., Bakshinov V.A., Biryukov M.A., Biryukov A.V. *Raspornyj dyubel* [Expansion dowel]. Utility model application no. 2015129970, 2015.

Разработка импортозамещающей технологии производства дюбель-гвоздей на основе численного моделирования методом конечных элементов / Бирюков М.А., Песин А.М., Чукин М.В., Картунов А.Д., Бакшинов В.А., Бирюков А.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14. №1. С. 52–59. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-1-52-59

Biryukov M.A., Pesin A.M., Chukin M.V., Kartunov A.D., Bakshinov V.A., Biryukov A.V. Development of an import-substituting technology of dowel-nails production the basis of numerical modelling with the finite-element method. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 1, pp. 52–59. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-1-52-59

УДК 621. 771

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-1-59-68

РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС

Кушнарев А.В.¹, Богатов А.А.², Киричков А.А.¹, Пузырев С.С.²

¹ ОАО «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат», Нижний Тагил, Россия

² Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

Аннотация. В работе представлены результаты исследования технологического процесса производства железнодорожных колес, направленные на снижение расходного коэффициента металла, материальных и энергетических затрат, повышение стабильности характеристик качества и долговечности колес. В ОАО «ЕВРАЗ НТМК» выполнена комплексная широкомасштабная работа, найдены и внедрены в производство новые технические решения совершенствования конвертерного передела и внепечной обработки стали, получения слитка на МНЛЗ, освоения новых технологических схем деформационной обработки при штамповке, прокатке, прессовой гибке, правке и калибровке колеса.

В результате совмещения операций осадки, разгонки и калибровки заготовки на стадии предварительной штамповки, а также применения способа самоцентрирования поковки в штампах окончательной формовки обеспечено повышение точности чернового колеса и уменьшение массы исходной заготовки. Прессопрокатная линия имеет высокий уровень автоматизации всех операций, а метрологическое обеспечение технологического процесса способствует появлению рекомендаций по корректировке параметров настройки в режиме реального времени и минимизации брака. Ужесточение требований точности нагрева колес под закалку и использование рациональной скорости охлаждения обода колеса на закалочных столах способствовали освоению производства твердых (320 НВ) и особо твердых (350 НВ) колес со стабильными показателями качества. Эксплуатационные характеристики железнодорожных колес увеличены в 1,5 раза, в том числе благодаря внедрению полнопрофильной механической обработки колеса, дробеметному упрочнению диска и ужесточению приборного ультразвукового и магнитолуминисцентного способов контроля качества.

Ключевые слова: железнодорожное колесо; литая заготовка; штампы; штамповка; внепечная обработка стали; непрерывная разливка; модификация; вакуумирование; компьютерное моделирование; метрология; точность размеров; закалка; отпуск; механическая обработка; дробеметное упрочнение; приборный контроль качества.

Введение

Производство железнодорожных колес основано на общей технологической схеме: получение непрерывнолитой заготовки и раскрой ее на мерные длины; нагрев заготовки и гидросбив окалина; предварительная и окончательная штамповка

заготовки; прокатка штампованной поковки на колесопрокатном стане; прошивка ступицы, прессовая гибка, правка и калибровка колеса. Черновые колеса подвергаются закалке и отпуску, полнопрофильной механической обработке, балансировке и дробеметному упрочнению диска. Готовое колесо подвергается магнитолуминисцентному и ультразвуковому контролю для выявления по-

© Кушнарев А.В., Богатов А.А., Киричков А.А., Пузырев С.С., 2016

верхностных и внутренних дефектов. Многие из перечисленных операций впервые были освоены в ОАО «ЕВРАЗ НТМК» и способствовали снижению производственных затрат и повышению служебных характеристик колес при эксплуатации.

1. Повышение качества непрерывнолитых заготовок

Качество колесной стали, химический состав которой для трех марок приведен в табл. 1, формируется на стадиях десульфурации и дефосфорации чугуна или полупродукта, при внепечной обработке с целью предотвращения образования неметаллических включений, микролегирования и модифицирования стали, при продувке аргоном в печи-ковше и вакуумировании [1–4].

Химический состав колесных марок стали, %

Марка стали	C	Mn	Si	Cr	Ni	V	S	P
2	0,55–0,63	0,50–0,90	0,22–0,45	≤0,30	≤0,30	≤0,10	≤0,025	≤0,030
T	0,62–0,70	0,50–1,00	0,22–0,65	≤0,40	≤0,30	≤0,15	0,005–0,025	≤0,030
C	0,68–0,77	0,66–1,00	0,22–0,65	0,10–0,50	≤0,35	0,05–0,15	≤0,015	≤0,020

Новые технологические решения, направленные на совершенствование технологии переработки ванадийсодержащего чугуна дуплекс-процессом, освоение технологии десульфурации полупродукта, комбинированной продувки стали и присадки шлакообразующих материалов в конвертере, обеспечили высокую стабильность результатов от плавки к плавке, снижение окисленности стали и потерь металла со шлаком, уменьшение расхода ферросплавов, снижение содержания серы и фосфора. Освоение технологии внепечной обработки стали способствовало выравниванию температуры и усреднению химического состава в объеме ковша, удалению и модифицированию неметаллических включений, дегазации металла и внедрению технологии безалюминиевого раскисления стали за счет ввода кремний- и марганецсодержащих ферросплавов. Содержание общего кислорода снизилось с 82 ppm перед печью-ковшом до 15 ppm после вакуумирования, содержание водорода в вакуумированной стали не превысило 2 ppm. Загрязненность стали неметаллическими включениями по сравнению с мартеновской технологией снизилась в разы, а брак колес по УЗК снизился с 1,4 до 0,1%. При освоении непрерывной разливки ста-

ли добились получения слитка с плотной мелкозернистой структурой без рыхлости и трещин в осевой зоне слитка, предотвратили вторичное окисление стали в металлопроводах МНЛЗ, внедрили рациональный режим охлаждения слитка [5].

2. Модернизация технологии нагрева и обжигания заготовки на прессопрокатной линии

Железнодорожные колеса изготавливаются из высокоуглеродных марок стали (см. табл. 1), к нагреву которых предъявляются особые требования по скорости и равномерности нагрева. На нагревательной печи до реконструкции разница температур по сечению заготовки достигала 50°C, а между отдельными заготовками в одной партии до 60°C, отклонение фактических результатов нагрева заданным параметрам составляло (10–15)°C, угар металла достигал 3%, на поверхности заготовки образовывалась трудноотделяемая окалина. После реконструкции

печи эти показатели были значительно улучшены: разность температур по сечению заготовки не превышает 15°C, а величина угара металла менее 0,75%. Успешно внедрена технология гидросбива окалины перед обжигом заготовок на прессе, благодаря чему отсутствуют забракованные колеса по вкатанной окалине.

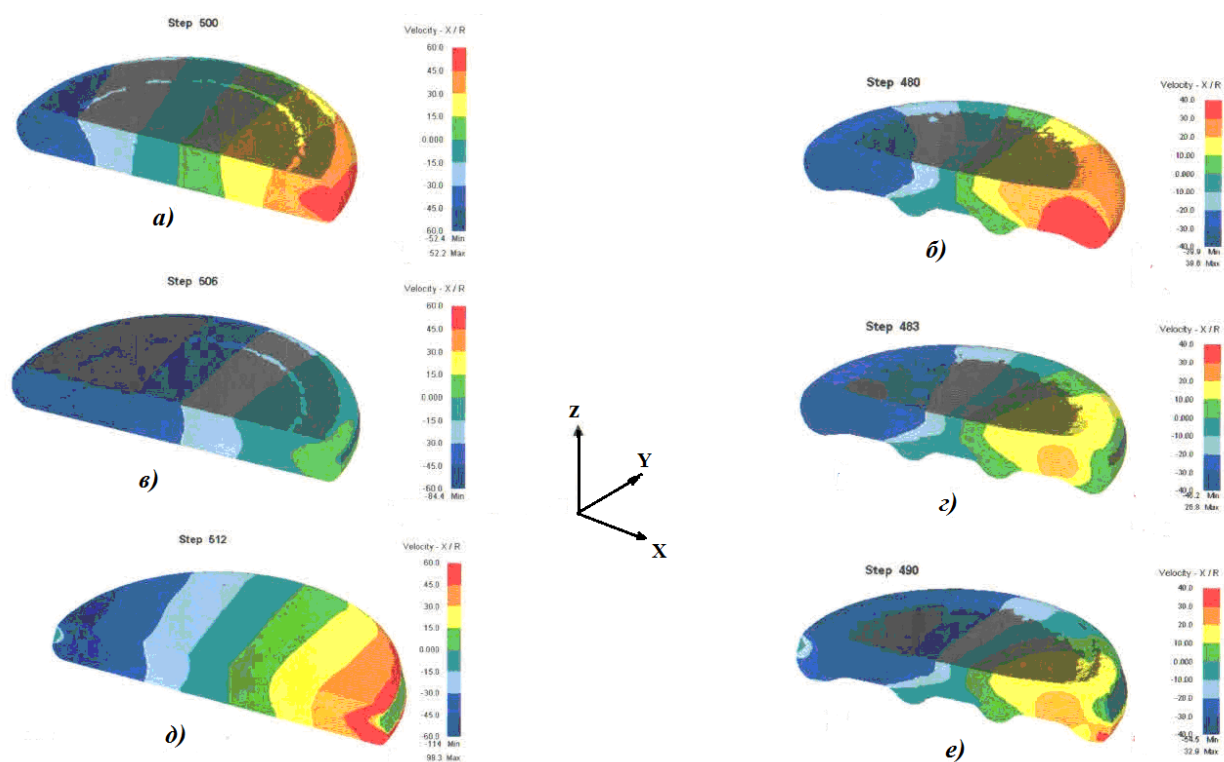
Технологическая схема деформации непрерывнолитой заготовки на прессопрокатной линии разработана фирмой «SMS EUMUCO» и предусматривает предварительную и окончательную штамповку на одном либо раздельно на двух прессах, прокатку штампованной поковки на колесопрокатном стане, прошивку ступицы, выгибку диска, правку и калибровку черного колеса на прессе. Исследование формоизменения заготовки и силовых параметров указанных технологических процессов осуществлялось методом компьютерного моделирования с использованием программы DEFORM 3D. Целью исследования являлось определение рационального соотношения обжигания при штамповке и прокатке [6], оценка влияния формы и размеров поковки после предварительной штамповки на качество оформления поковки при окончательной штамповке [7–14]. На новые технические решения получены патенты

Таблица 1

РФ [7, 8]. Важным результатом компьютерного моделирования технологического процесса явилось изучение асимметричного радиального течения металла под влиянием отклонения формы и размеров заготовки от идеального цилиндра, неточности настройки инструмента деформации и установки заготовки в межштамповом пространстве [15].

Неудовлетворительная настройка технологического процесса на стадии предварительной штамповки характеризовалась следующими значениями: овальность заготовки $\Delta D = 6,5$ мм; косина реза $S = 5$ мм; неточность установки заготовки на нижнем штампе $\delta_2 = 3$ мм, отклонение осей нижнего и верхнего штампа отсутствовало, $\delta_1 = 0$ мм. Исследование формоизменения заготовки, полученное в штампах с гравюрой, разработанной фирмой «SMS EUMUCO», показало, что перепад по толщине обода достигал 12 мм, а разница радиусов поковки из-за эксцентриситета расположения ступицы относительно обода составляла 7 мм. Причиной этого несоответствия является свободное истечение металла из центральной части штампового пространства в периферийную, без ограничения наружной поверхности обода поковки. В промышленных опытах при освоении

технологии SMS EUMUCO теоретические расчеты получили подтверждение: максимальная разница в наружных диаметрах на одной заготовке достигала 23–25 мм, а по ширине обода 21 мм. Таким образом, технология предварительной штамповки оказалась чувствительной к настройке пресса и приводила при дальнейшей обработке к неравномерному распределению массы по периметру поковки, а затем чернового колеса, появлению дефектов прокатного происхождения. Суммарный брак колес по дефектам проката не опускался ниже 24,9%. Освоение предварительной штамповки заготовок по новому способу [7] способствовало повышению точности черновых колес и уменьшению брака до 1,5%. Развитие идеи совмещения при предварительной штамповке операций осадки, разгонки и калибровки, а также применения операции самоцентрирования поковки в штампах окончательной формовки [8] обеспечило повышение точности чернового колеса. Для двух разработанных способов предварительной штамповки [7, 8] методом компьютерного моделирования был выполнен сравнительный анализ формоизменения заготовки и поля скоростей (см. рисунок).



Формоизменение и поле скоростей непрерывнолитой заготовки при двух способах предварительной штамповки: а, в, д – в плоских штампах с подвижным калибровочным кольцом (способ 1); б, г, е – в профилированных штампах с неподвижным кольцом (способ 2)

На **рисунке** приведены результаты компьютерного моделирования двух новых способов черновой штамповки: на плоских штампах с подвижным калибровочным кольцом (способ 1) [7] и на профилированных штампах с закрепленным кольцом (способ 2) [8]. Масса заготовки в обоих случаях принята одинаковой и равной $m = 482$ кг, овальность заготовки $\Delta D = 6,5$ мм, косина реза на обоих торцах $C = 5$ мм, смещение заготовки от оси штампов $\delta_2 = 3$ мм. Начальная стадия осадки заготовки в обоих случаях характеризуется осесимметричной деформацией без исправления геометрических нарушений очага деформации (см. **рисунок, а и б**). Для первого способа эта стадия продолжается до момента одностороннего контакта поковки с калибровочным кольцом, в результате которого оно перемещается до соосного положения с заготовкой. На второй стадии (см. **рисунок, в**) происходит формирование боковой поверхности поковки с односторонним течением металла, а на третьей – уменьшение недоштамповки до минимума, а деформация является осесимметричной (см. **рисунок, д**).

Для второго способа на первой стадии при осадке на верхнем торце поковки формируется выступ в виде полутора, ось которого совпадает с осью верхнего штампа и калибровочного кольца прессы R5000. Кроме того, на первой стадии

осуществляется разгонка металла и формируется обод черновой поковки увеличенной массы. Вторая стадия предварительной штамповки начинается с момента соприкосновения боковой поверхности поковки с калибровочным кольцом и характеризуется односторонним течением металла до момента завершения формовки поковки в калибровочном кольце таким образом, что ширина контакта кольца с поковкой становится одинаковой по периметру поковки. С этого момента начинается третья стадия штамповки с характерной осесимметричной деформацией, сопровождаемой уменьшением высоты поковки и увеличением ширины контакта ее с калибровочным кольцом. В результате образуется осесимметричная черновая поковка, которую передают роботом-манипулятором на пресс R9000. Черновая поковка на нижнем штампе может быть центрирована двумя способами: либо по контуру нижнего штампа в области перехода диска к ободу, либо после кантовки поковки на 180° с помощью осесимметричного выступа на торцевой поверхности поковки в виде полутора (см. **рисунок, е**).

Результаты теоретического анализа течения металла при окончательной штамповке на прессе R9000 показаны в **табл. 2** и **3** в зависимости от формы поковки, полученной на прессе R5000 разными способами.

Таблица 2

Время окончательной штамповки τ и радиус нейтрального сечения R_n в зависимости от величины недоштамповки δ для поковки, полученной способом 1 предварительной штамповки

δ , мм	65,1	55,9	46,2	36,5	26,7	17,6	13,2	9,1	4,5	0
R_n , мм	200	210	210	211	209	205	201	0	0	0
R_t , мм	–	–	–	–	–	–	–	150	100	25
τ , с	1,25	2,18	3,14	4,12	5,10	6,01	6,44	6,85	7,31	7,77

Таблица 3

Время окончательной штамповки τ и радиус нейтрального сечения R_n в зависимости от величины недоштамповки δ для поковки, полученной способом 2 предварительной штамповки

δ , мм	51,5	33,0	24,9	20,6	13,5	7,2	4,1	2,0	0,0
R_n , мм	201	207	209	214	214	214	202	0	0
R_t , мм	–	–	–	–	60	50	45	40	25
τ , с	1,4	3,24	4,06	4,37	5,09	5,72	6,02	6,25	6,44

Радиус нейтрального сечения определяет две зоны течения металла при окончательной штамповке – в ступицу и в обод. Из таблиц видно, что радиус нейтрального сечения в различные моменты окончательной штамповки, полученной способами 1 и 2, находится в диапазоне значений R_n от 200 до 214 мм, то есть наблюдается преимущественное течение металла в обод. Однако в обоих случаях оформление ступицы наступает раньше, чем обода. Величина недоштамповки в первом случае $\delta = 13,1$ мм, а во втором случае $\delta = 2,5$ мм соответствует моменту, когда радиус нейтрального сечения становится равным нулю $R_n = 0$, то есть наступает одностороннее течение металла от ступицы к ободу по всей контактной поверхности поковки. Это приводит к резкому росту силы штамповки, которая в момент завершения окончательной штамповки для первого случая составляет 74 МН, а для второго 67 МН. Отмеченные особенности течения металла при окончательной формовке поковки, полученной по способам 1 и 2, оказывают влияние на качество формовки обода, которое можно характеризовать значением радиуса оформления обода с наружной стороны колеса. Для первого случая при недоштамповке $\delta = 9,1$ мм, $R_f = 150$ мм, в то время как для второго случая $R_f = 50$ мм при $\delta = 7,2$ мм. Важным показателем преимущества применения поковки, полученной по способу 2, по сравнению с поковкой, полученной по способу 1, является уменьшение времени на окончательную штамповку с 7,77 с до 6,44 с.

Кроме того, повышение точности поковки и чернового колеса было достигнуто благодаря разработке и применению теоретического метода оценки точности поковки и чернового колеса [16]. Техническим результатом применения теоретического метода оценки точности поковки и чернового колеса 957 HW3N явилось развитие новых способов производства железнодорожных колес [8], основанных на самоцентрировании поковки в штамповом пространстве прессы окончательной штамповки. Освоение нового способа способствовало снижению массы заготовки на 6 кг, уменьшению припуска на механическую обработку, повышению производительности и надежности работы станков VDM 120-12 для полнопрофильной обточки колес.

Результаты компьютерного моделирования положены в основу определения рациональной гравюры штампов предварительной формовки. В результате была разработана САПР калибровки

инструмента деформации на прессопрокатной линии, благодаря этому на комбинате освоено 47 типоразмеров заготовок и цельнокатаных колес для нужд железнодорожного транспорта. Серьезным достижением явилось освоение цельнокатаных колес диаметром 1250 мм для скоростных локомотивов. Внедрение рациональной калибровки инструмента деформации, найденной путем компьютерного моделирования процесса предварительной и окончательной штамповки заготовки на прессах, а также последующей прокатки обеспечило получение поковки под прокатку с размерами высокой точности, силой штамповки на прессе R9000 менее 80 МН и величиной недоштамповки менее 0,5 мм [13].

Совершенствование конструкции валков колесопрокатного стана и корректировка параметров, вводимых в программу управления стана, позволили успешно освоить производство цельнокатаных колес и заготовок колес диаметром от 710 до 1250 мм, а также колесных центров и заготовок зубчатых колес с цилиндрической поверхностью круга катания без гребня. Освоено производство колес диаметром 957 мм с криволинейным (S-образным) диском для грузовых вагонов с повышенной осевой нагрузкой. Для европейского и североамериканского рынков освоено производство цельнокатаных колес диаметром 920 и 914 мм с криволинейным диском для грузовых вагонов.

Технико-экономические показатели производства продукции на прессопрокатной линии в значительной мере зависят от стойкости инструмента деформации. Основными факторами, влияющими на стойкость инструмента, являются: температура поверхности штампов и валков; гравюра штампов и калибровка валков; величина нормальных контактных напряжений и скорость скольжения металла; качество технологической смазки и охлаждения инструмента. Наиболее неблагоприятные условия работы инструмента имеют место на прессе R9000. Причиной выхода штампов из строя являются: сетка разгара, выкрашивание, налипание металла, общий износ. Технические решения повышения стойкости инструмента деформации были найдены в соответствии с программой импортозамещения. Технология изготовления штампов и их восстановления способом наплавки была освоена на комбинате. Вместо импортных марок технологической смазки была освоена отечественная смазка «Атлантик»

Лансон 1001». Благодаря внедрению указанных выше мероприятий норма расхода штампов в 2012–2014 годах по сравнению с периодом 2007–2011 годов уменьшилась в 1,6 раза, повысились качество оформления поковок и производительность прессопрокатной линии, цикл проката составил 39–40 с [17].

3. Научное обоснование и внедрение новой технологии и оборудования для термообработки колес

Анализ результатов промышленных экспериментов, проведенных с целью определения рационального химического состава колесной стали, температуры нагрева под закалку и отпуска, расхода воды и скорости охлаждения, показал, что оборудование участка термообработки не обеспечивает стабильные результаты по твердости из-за неудовлетворительных технических характеристик нагревательной печи, закалочных столов. В техническом задании реконструкции термического отделения были сформулированы следующие требования:

- температура нагретых колес под закалку и отпуск устанавливается на оптимальном уровне с точностью $\pm 5^\circ\text{C}$;
- рациональные значения скорости охлаждения обеспечиваются оборудованием закалочных столов устройствами по регулированию расхода охладителя (вода, воздух);
- закалочные столы имеют высокий уровень автоматизации и обеспечивают воспроизводимые режимы независимо от работы оператора.

Исследование влияния скорости охлаждения на формирование структуры и твердости стали трех марок 2, Т и С, разработанных в ОАО «ЕВРАЗ НТМК» совместно с ОАО «ВНИИЖТ», проводилось методом физического моделирования на комплексе Gleeble 3500 совместно с сотрудниками Магнитогорского государственного технического университета Г.И. Носова [18]. Результаты исследования представлены в **табл. 4**.

Из анализа данных **табл. 4** следует, что с увеличением содержания в стали углерода и легирующих элементов (Cr, Ni, V), которые повышают устойчивость переохлажденного аустенита и способствуют уменьшению размера зерна и повышению дисперсности перлита, верхнее значение скорости охлаждения, определяющее распад аустенита по диффузионному механизму с образованием феррито-

карбидной смеси и избыточного феррита, уменьшается. Для стали марки 2 эта скорость равна $7^\circ\text{C}/\text{с}$, для стали марки Т – $4^\circ\text{C}/\text{с}$, а для стали марки С – $3^\circ\text{C}/\text{с}$. Увеличение скорости охлаждения выше указанного значения приводит к образованию игольчатых составляющих структуры бейнита и мартенсита, которые снижают эксплуатационные характеристики железнодорожных колес и приводят к выкрашиванию металла на поверхности катания колеса. Указанные значения скорости охлаждения толщина ферритных пластинок в перлите и твердость для стали марки 2 равны 0,195 мкм и 303 НВ, для стали марки Т – 0,140 мкм и 342 НВ, для стали марки С – 0,119 и 371 НВ. Стандартами регламентируется значение твердости на глубине от поверхности катания 30 мм для твердых колес не менее 320 НВ, а для особо твердых колес не менее 340 НВ. Таким образом, видно, что из стали марки 2 ни твердые, ни особо твердые колеса получить нельзя. При освоении нового оборудования для термоупрочнения колес [19–21] были отработаны основные параметры новой технологии:

- температура нагрева колес под закалку $(950\pm 5)^\circ\text{C}$;
- продолжительность охлаждения на закалочных машинах 300 с;
- температура воды при закалке колес $(35\pm 3)^\circ\text{C}$;
- минимальный расход воды 12 л/мин;
- максимальный расход воды 60 л/мин;
- температура отпуска колес $(510\pm 10)^\circ\text{C}$.

Для исключения случаев формирования неоднородной структуры разработаны и внедрены технические решения [22–24]:

- уменьшено количество форсунок с 16 до 6 ед.;
- разработаны конструкции форсунок, надежно работающих при малых расходах воды;
- введена в эксплуатацию система «Bypass» для управления скоростью охлаждения [22];
- разработана схема расположения форсунок и изготовлены шаблоны для быстрой и точной их настройки;
- для каждой марки стали разработана и освоена технология дифференцированного охлаждения рабочего слоя обода и его торца во времени [25, 26].

В результате освоения новой технологии термоупрочнения колес достигли стабильного уровня механических свойств (**табл. 5**).

Таблица 4

Характеристики микроструктуры и твердости колесных марок стали в зависимости от скорости охлаждения

Марка стали	Скорость охлаждения, °С/с	Относительная объемная доля структурных составляющих, %				Межпластинчатое расстояние в перлите, мкм	Твердость		
		Ф	ФКС	Б	М		HV ₅	HRC	HB
2	4	6	94	0	0	0,233	303	30	276
	7	5	95	0	0	0,233	321	32	303
	10	4	84	0	12	0,150	335	34	319
Т	1	3	97	0	0	0,155	334	35	323
	4	2	98	0	0	0,140	360	36	342
	5	2	38	26	34	0,130	380	39	363
С	2,5	2	98	0	0	0,120	329	36	341
	3,0	2	98	0	0	0,119	390	40	371
	3,25	1	97	19	33	0,118	408	41	390

Таблица 5

Механические свойства стали (средние значения за 6 мес. 2013 г.)

Марка стали	Временное сопротивление σ_b , Н/мм ² , на ободе	Относительное удлинение δ , %, на ободе	Относительное сужение ψ , %, на ободе	Ударная вязкость при +20 °С, КСИ, Дж/см ² , на ободе	Твердость HB на глубине 30 мм от поверхности обода
2	1016	15	33	44	285
Т	1161	14	31	25	341
С	1272	14	28	35	368

Эти значения получены в результате усреднения данных испытания образцов за период 6 мес. 2013 г., что свидетельствует о стабильности технологического процесса производства колес.

4. Финишная обработка и контроль качества железнодорожных колес на поточной линии

Одним из наиболее опасных эксплуатационных дефектов являются усталостные трещины в дисках цельнокатаных колес. Чаще всего такие трещины возникают с внутренней стороны колеса в месте сопряжения диска с ободом. Полигонные и лабораторные испытания колес показали, что наличие дефектов металлургического либо прокатного происхождения способствуют ускоренному развитию трещин. Наличие растягивающих остаточных напряжений в опасной зоне также снижает время работы колеса до появления усталостной трещины. Дробеструйная обработка диска приводит к снижению уровня и смене знака остаточных напряжений. Внедрение полнопрофильной механической обработки колес на автоматизированной поточной линии станков с числовым программным управлением обеспечило повышение эксплуатационного ресурса на 15–20% за счет отсутствия поверхностных дефектов и образования сжимающих напряжений после дробенаклепа в пределах 100–150 МПа. Повышению стабильности характеристик качества колес способствует освоение приборного неразру-

шающего контроля, который включает:

- контроль и оценку точности размеров колес;
- ультразвуковой контроль обода, диска и ступицы с целью выявления внутренних дефектов и проверки однородности структуры металла обода;
- магнитопорошковый контроль боковых поверхностей с целью выявления поверхностных дефектов;
- ультразвуковой контроль распределения остаточных напряжений в ободу (для колес повышенной твердости);
- контроль твердости металла обода и ступицы.

Заключение

Проведение комплекса работ по улучшению качества стали, реконструкции прессы прокатной линии и модернизации технологии пластической обработки заготовок, совершенствованию оборудования и технологии термической обработки, а также финишной обработке колес и ужесточению приборного неразрушающего контроля качества в ОАО «ЕВРАЗ НТМК» обеспечило увеличение эксплуатационной надежности, долговечности железнодорожных колес и безопасности грузовых перевозок. Количество колес, забракованных потребителями в стадии поставки в 2015 году в сравнении с 2008 годом, сократилось в 3,6 раза, а забракованных в процессе эксплуатации – в 4,7 раза.

Список литературы

- Кушнарев А.В. Использование инжекционных технологий внепечной десульфурации ванадийсодержащего чугуна-полупродукта в конвертерном цехе НТМК // *Металлург.* 2004. № 10. С. 36–38.
- Кушнарев А.В., Смирнов Л.А. Современное состояние и перспективы переработки титано-магнетитового ванадийсодержащего сырья в России // *Черная металлургия. Бюл. науч.-техн. и экон. информации.* 2013. № 5. С. 3–20.
- Разработка и развитие передела ванадийсодержащих чугунов кислородно-конвертерным процессом / А.В. Кушнарев [и др.] // *Сталь.* 2013. № 9. С. 32–36.
- Кушнарев А.В. Новая технология производства колесной стали в ОАО «ЕВРАЗ НТМК» // *Черные металлы.* 2014. № 3. С. 33–37.
- Кушнарев А.В. Повышение качества непрерывнолитого слитка из колесной стали в ОАО «ЕВРАЗ НТМК» // *Черные металлы.* 2014. № 3. С. 28–32.
- Кушнарев А.В., Богатов А.А., Кропотов В.А. Выбор рационального соотношения обжатий при штамповке и прокатке железнодорожных колес // *Производство проката.* 2010. № 3. С. 21–24.
- Способ штамповки заготовок для цельнокатаных колес : пат. 2335373 Рос. Федерация : МПК С 2 В 21 К 1/28 (2006.01), В 21 Н 1/04 (2006.01) / Кушнарев А.В., Киричков А.А., Шестаков В.Д., Петренко Ю.П., Васильев А.А., Султинских И.Е., Зудов А.Ф.; патентообладатель ОАО «НТМК». № 2006128068/02 ; заявл. 01.08.2006; опубл. 10.10.2008, Бюл. № 28.
- Способ изготовления цельнокатаных железнодорожных колес: пат. 2404009 Рос. Федерация: МПК В 21 Н 1/04 (2006.01), В 21 К 1/28 (2006.01) / Кушнарев А.В., Богатов А.А., Киричков А.А., Кропотов В.А., Шестаков В.Д., Петренко Ю.П.; патентообладатель ОАО «НТМК». № 2008115847/02; заявл. 21.04.2008; опубл. 20.11.2010, Бюл. № 32.
- Кушнарев А.В., Богатов А.А., Кропотов В.А. Математическое моделирование черновой и чистовой штамповки непрерывнолитых заготовок, используемых при производстве железнодорожных колес // *Кузнечно-штамповочное производство.* 2010. № 1. С. 34–38.
- Развитие и освоение в ОАО «Нижнетагильский металлургический комбинат» новой технологии производства железнодорожных колес высокого качества / А.В. Кушнарев [и др.] // *Производство проката.* 2008. № 1. С. 24–28.
- Introduction of wheel production on a new pressing and rolling line / A. V. Kushnarev [et. al.] // *Steel in Translation.* 2010. Vol. 40. № 12. P. 1098–1100.
- Production of high-quality railroad wheels / A.V. Kushnarev [et. al.] // *Steel in Translation.* 2010. Vol. 40. № 3. P. 268–272.
- Кушнарев А.В. Разработка научных основ и внедрение современной технологии производства железнодорожных колес с высокими эксплуатационными характеристиками // *Инновационные технологии в металлургии и машиностроении / под. ред. А.А. Богатова.* Екатеринбург, 2013. С. 626–637; Заготовительные производства в машиностроении. 2013. № 1. С. 17–26.
- Improved wheel rolling / A.V. Kushnarev [et. al.] // *Steel in Translation.* 2010. Vol. 40. № 5. P. 485–487.
- Кушнарев А.В. Разработка и теоретическое исследование новых способов изготовления железнодорожных колес на ОАО «НТМК» / А.В. Кушнарев, науч. консультант, проф. А.А. Богатов; ГОУ ВПО «Уральский гос. техн. ун-т им. первого Президента России Б.Н. Ельцина; ОАО «Нижнетагильский металлург. комбинат». Нижний Тагил, 2009. 46 с.
- Кушнарев А.В., Богатов А.А. Теоретический метод оценки точности поковок и железнодорожных колес // *Производство проката.* 2015. №9. С. 23–26.
- Стойкость штампового инструмента при изготовлении железнодорожных колес / А.В. Кушнарев [и др.] // *Производство проката.* 2015. №5. С. 46–48.
- Структурно-фазовые превращения при непрерывном охлаждении сталей для цельнокатаных железнодорожных колес / А.В. Кушнарев [и др.] // *Сталь.* 2014. № 4. С. 78–83.
- Теоретическое обоснование и отработка конкретных режимов термообработки колес с целью получения твердости 320-360НВ: аннотированный отчет: работа Д 1084/2006 / Трансметалл.
- Разработка технологии изготовления цельнокатаных колес с твердостью обода 350-390НВ на новом термоучастке КБЦ ОАО «НТМК»: аннотированный отчет: Работа ДГНТЗ-2679.-2010. ИСО-лаб.
- Определение влияния скорости охлаждения на превращения переохлажденного аустенита в сталях: технический отчет. Работа ДГНТЗ-00-7408/2013 / ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова».
- Современный комплекс термообработки железнодорожных колес / А.В. Кушнарев [и др.] // *Черная металлургия. Бюл. науч.-техн. и экон. информации.* 2010. № 4. С. 38–39.
- Производство на ОАО «НТМК» колес повышенной твердости / С.В. Филатов [и др.] // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации.* 2011. № 3. С. 52–57.
- Способ термической обработки железнодорожных колес : пат. 2451093 Рос. Федерация : МПК С 21 Д 9/34 (2006.01) / Кушнарев А.В., Фомичев М.С., Киричков А.А., Теляшов Н.В., Тимофеев В.В., Петренко Ю.П., Флатов В.Г.; патентообладатель ОАО «НТМК». № 2010112161/02; заявл. 29.03.2010; опубл. 20.05.2012, Бюл. № 14.
- Технология производства железнодорожных колес повышенной твердости из стали Т / А.В. Кушнарев [и др.] // *Сталь.* 2011. № 11. С. 122–124.
- Научное обоснование и внедрение новой технологии и оборудования для термической обработки колес / А.В. Кушнарев [и др.] // *Черная металлургия. Бюл. науч.-техн. и экон. информации.* 2015. №6. С. 19–23.

Материал поступил в редакцию 02.03.16.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-1-59-68

RAILWAY WHEEL MANUFACTURING PROCESS IMPROVEMENT

Kushnarev Aleksey Vladislavovich – D.Sc. (Eng.), Managing Director of EVRAZ NTKM Open Joint Stock Company, Nizhni Tagil, Russia. E-mail: director@ntmk.ru.

Kirichkov Anatoly Aleksandrovich – Ph.D. (Eng.), Advisor to the Managing Director of EVRAZ NTKM for Research and Technology Advancement, Nizhni Tagil, Russia. E-mail: anatoly.kirichkov@evraz.com.

Bogatov Aleksander Aleksandrovich – D.Sc. (Eng.), Professor, Head of the Metal Forming Department, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia. E-mail: omd@urfu.ru.

Puzyrev Sergey Sergeyevich – Postgraduate Student, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia. E-mail: siga@inbox.ru.

Abstract. This work summarises the results of research on the railway wheel manufacturing process focused on reduction of the metal consumption index, material and energy savings, and better wheel performance reproducibility and durability. "EVRAZ NTMK" Open Joint Stock Company has completed a comprehensive and ambitious initiative to find and apply new technical solutions for improved converter treatment and secondary metallurgy, continuous casting processes, new process flow charts of wheel deformation processing by forging, rolling, dishing, restriking, and preforming.

The rough wheel accuracy increased and the wheel block weight decreased due to a combination of upsetting, spreading and sizing of wheel blocks at blocker-type forging, as well as the application of the method of forging self-alignment in final molding dies. The forging and rolling line is highly automated; process measurement capabilities ensure occurrence of online setting correction prompts and minimization of wastes. Hard wheels (320 HB) and super hard wheels (350 HB) of sustainable quality have been manufactured due to strengthening of requirements on wheel austenitizing temperature accuracy and the application of a rational wheel-tread quenching rate. Railway wheel service performance has been increased by 50% due to the implementation of a full-profile wheel machining, wheel plate shot peening, and tougher ultrasonic and fluorescent magnetic particle methods of quality control.

Keywords: Railway wheel; cast billet; dies; forging; secondary metallurgy; continuous casting; modification; vacuum degassing; computer simulation; measurements; size precision; quenching; tempering; machining; shot peening; instrumental quality monitoring.

References

1. Kushnarev A.V. Ispolzovanie inzhetsionnykh tekhnologiy vnep-echnoy desulfuratsii vanadisoderzhashchego chugunapoluprodukta v konvertornom tsekhe NTMK [Application of the DeV hot metal desulfurizing injection processes at the BOS of the NTMK]. *Metallurg* [Metallurgist]. 2004, no. 10, pp. 36–38.
2. Kushnarev A.V., Smirnov L.A. Sovremennoe sostoianie i perspektivy pererabotki titano-magnetitovogo vanadisoderzhashchego syria v Rossii [Present and future of titanium and vanadium iron ore processing in Russia]. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii* [Ferrous metallurgy. Science, Technology and Economy Bulletin]. 2013, no. 5, pp. 3–20.
3. Kushnarev A.V. (et al.) Razrabotka i razvitie peredela vanadisoderzhashchikh chugunov kislородно-konvertiernym protsessom [Engineering and improvement of vanadium-bearing cast iron LD processing]. *Stal* [Steel]. 2013, no. 9, pp. 32–36.
4. Kushnarev A.V. Novaya tehnologiya proizvodstva kolesnoy stali na OAO «EVRAZ NTMK» [New wheel steel manufacturing process at "EVRAZ NTMK" OJSC]. *Chiomye metally* [Ferrous metals]. 2014, no. 3, pp. 33–37.
5. Kushnarev A.V. Povyshenie kachestva nepreryvnitogo slitka iz kolesnoy stali na OAO «EVRAZ NTMK» [Improvement of the quality of continuous wheel steel cast billet at "EVRAZ NTMK" OJSC]. *Chiomye metally* [Ferrous metals]. 2014, no. 3, pp. 28–32.
6. Kushnarev A.V., Bogatov A.A., Kropotov V.A. Vybór ratsionalnogo sootnosheniya obzhatiy pri shtampovke i prokatke zheleznodorozhnykh kolios [Selection of an efficient ratio of reductions during railway wheel forging and rolling]. *Proizvodstvo prokata* [Rolled steel manufacturing]. 2010, no. 3, pp. 21–24.
7. Kushnarev A.V., Kirichkov A.A., Shestak V.D., Petrenko Yu.P., Vasilev A.A., Sultinskiy I.E., Zudov A.F. *Sposob shtampovki zagotovok dlya tselnokatanykh kolios* [All-rolled wheel block forging technique]. Patent no. 2335373 Russian Federation, 2008.
8. Kushnarev A.V., Bogatov A.A., Kirichkov A.A., Kropotov V.A., Shestak V.D., Petrenko Yu.P. *Sposob izgotovleniya tselnokatanykh zheleznodorozhnykh kolios* [All-rolled railway wheel manufacturing technique]. Patent no. 2404009 Russian Federation, 2010.
9. Kushnarev A.V., Bogatov A.A., Kropotov V.A. Matematicheskoe modelirovaniye chernovoy i chistovoy shtampovki nepreryvnitlykh zagotovok, ispolzuemykh pri proizvodstve zheleznodorozhnykh kolios [Mathematical modeling of rough and fine die forging of continuous cast blocks used for railway wheel manufacturing]. *Kuznechno-shtampovnoye proizvodstvo* [Die forging]. 2010, no. 1, pp. 34–38.
10. Kushnarev A.V. (et al.) Razvitie i osvoenie v OAO «Nizhnetagil'skiy metallurgicheskyy kombinat» novoy tekhnologii proizvodstva zheleznodorozhnykh kolios vysokogo kachestva [Development and assimilation of a new process of high-quality railway wheel manufacturing at the "Nizhniy Tagil Metallurgical Plant" OJSC]. *Proizvodstvo prokata* [Rolled steel manufacturing]. 2008, no. 1, pp. 24–28.
11. Kushnarev A.V., Kirichkov A.A., Shestak V.D. [et al.] Introduction of wheel production on a new pressing and rolling line. *Steel in Translation*. 2010, vol. 40, no. 12, pp. 1098–1100.
12. Kushnarev A.V., Kirichkov A.A., Petrenko Yu.P., Bogatov A.A. Production of high-quality railroad wheels. *Steel in Translation*. 2010, vol. 40, no. 3, pp. 268–272.
13. Kushnarev A. V. Razrabotka nauchnykh osnov i vnedrenie sovremennoy tekhnologii proizvodstva zheleznodorozhnykh kolios s vysokimi ekspluatatsionnymi kharakteristikami [Development of scientific principles and implementation of a modern high-performance railway wheel manufacturing process]. *Innovatsionnye tekhnologii v metallurgii i mashinostroenii* [Innovative steelmaking and machine building processes]. 2013, pp. 626–637.
14. Kushnarev A.V., Vasilev A.A., Shestak V.D., Bogatov A.A. Improved wheel rolling. *Steel in Translation*. 2010, vol. 40, no. 5, pp. 485–487.
15. Kushnarev A.V., Bogatov A.A. Razrabotka i teoreticheskoye issledovanie novykh sposobov izgotovleniya zheleznodorozhnykh kolios na OAO «NTMK» [Development and theoretical exploration of new railway wheel manufacturing techniques at "NTMK" OJSC]. *Nizhniy Tagil*, 2009, p. 46.
16. Kushnarev A.V., Bogatov A.A. Teoreticheskyy metod otsenki tochnosti pokovok i zheleznodorozhnykh kolios [Theoretical evaluation method of forging and railway wheel accuracy]. *Proizvodstvo prokata* [Rolled steel manufacturing]. 2015, no. 9, pp. 23–26.
17. Kushnarev A.V. (et al.) Stoikost shtampovogo instrumenta pri izgotovlenii zheleznodorozhnykh kolios [Forging tool durability in railway wheel manufacturing]. *Proizvodstvo prokata* [Rolled products manufacturing]. 2015, no. 5, pp. 46–48.
18. Kushnarev A.V. (et al.) Strukturno-fazovyye prevrashcheniya pri nepreryvnom okhlazhdenii staley dlya tselnokatanykh zheleznodorozhnykh kolios [Structural and phase transformations in continuous cooling of steels for all-rolled railway wheels]. *Stal* [Steel]. 2014, no. 4, pp. 78–83.
19. Teoreticheskoye obosnovaniye i otrabotka konkretnykh rezhimov termooobrabotki kolios s tseliú polucheniya tverdosti 320–360 HB [Theoretical justification and development of specific wheel heat treatment conditions to obtain 320–360 HB hardness]: annotirovannyi otchiot [annotation report]: rabota D 1084/2006 / Transmetall.
20. Razrabotka tekhnologii izgotovleniya tselnokatanykh kolios s tverdostiú oboda 350–390 HB na novom termouchastke KBTs OAO

- «NTMK» [Development of an all-rolled wheel manufacturing process to obtain 350–390 HB tread hardness at a new wheel heat treatment plant of the "NTMK" OJSC wheel shop]: annotirovanny otchiot [annotation report]: Rabota DGNT3-2679. 2010. ISO-lab.
21. Opredelenie vliyaniya skorosti okhlazhdeniya na prevrashcheniya pereokhlazhdionnogo austenita v staliakh [Determination of the cooling rate impact on undercooled austenite transformations in steels]: tekhnicheski otchiot [technical report]. Rabota DGNT3-00-7408/2013 / FGBOU VPO Magnitogorsky gosudarstvenny tekhnichesky universitet im. G.I. Nosova [Nosov Magnitogorsk State Technical University].
 22. Kushnarev A.V. (et al.) Sovremenny kompleks termoobrabotki zheleznodorozhnykh kolios [Modern railway wheel heat treatment complex]. *Chiomaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii* [Ferrous metallurgy. Science, Technology and Economy Bulletin]. 2010, no. 4, pp. 38–39.
 23. Filatov S.V. (et al.) Proizvodstvo na OAO «NTMK» kolios povyshennoy tvordosti [Hard wheel manufacturing at "NTMK" OJSC]. *Chiomaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii* [Ferrous metallurgy. Science, Technology and Economy Bulletin]. 2011, no. 3, pp. 52–57.
 24. Kushnarev A.V., Fomichev M.S., Kirichkov A.A., Telyashov N.V., Timofeev V.V., Petrenko Yu.P., Flatov V.G. *Sposob termicheskoy obrabotki zheleznodorozhnykh kolios* [Railway wheel heat treatment technique]. Patent no. 2451093 Russian Federation, 2012.
 25. Kushnarev A.V. (et al.) Tekhnologiya proizvodstva zheleznodorozhnykh kolios povyshennoy tvordosti iz stali T [Hard T-steel wheel manufacturing process]. *Stal* [Steel]. 2011, no. 11, pp. 122–124.
 26. Kushnarev A.V. (et al.) Nauchnoe obosnovanie i vnedrenie novoy tekhnologii i oborudovaniya dlia termicheskoy obrabotki kolios [Scientific rationale and implementation of new wheel heat treatment process and equipment]. *Chiomaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii* [Ferrous metallurgy. Science, Technology and Economy Bulletin]. 2015, no. 6, pp. 19–23.
-
- Развитие технологии производства железнодорожных колес / Кушнарев А.В., Богатов А.А., Киричков А.А., Пузырев С.С. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14. №1. С. 59–68. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-1-59-68
- Kushnarev A.V., Kirichkov A.A., Bogatov A.A., Puzyrev S.S. Railway wheel manufacturing process improvement. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 1, pp. 59–68. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-1-59-68
-

ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

UDC 621.73

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-1-69-78

BEHAVIORS OF BULK METALLIC GLASS UNDER SHOCK LOADING

Atroshenko S.A.

Institute for Problems of Mechanical Engineering, Russian Academy of Science, Saint Petersburg, Russia

Abstract. The high-strain-rate method of materials for dynamic strength investigations under micro and sub-microsecond durations of shock loads on the base of electrical explosion of conductors have been developed. The experimental investigations of dynamic properties for bulk metallic glass on the base of Ti and Zr under shock loads of sub-microsecond duration ($\sim 0.5\text{--}0.7\ \mu\text{s}$) in the pressure range up to 12 GPa have been carried out. The values of Hugoniot elastic limit (HEL) and spall strength for these amorphous alloys have been received. The Hugoniot shock adiabat parameters were determined in the space $U_{sh} - u_p$. The result of microstructure analysis of saved specimens revealed areas of recrystallization.

Keywords: bulk metallic glass, shock load, electrical explosion of conductors, dynamic strength, Hugoniot elastic limit, spall strength.

Introduction

The solution of many technical problems is connected with understanding the processes of the appearance and the propagation of shock waves, with knowledge on physical-mechanical parameters defining behavior of materials under high-strain-rate. The investigation of shock-wave processes in the materials gives possibility to receive information on interconnection for materials microstructure and macroscopic parameters defining their behavior under pulse loading and about the influence on the dynamic strength of solids.

More information on the influence of correlation of material scale level structure and dimensional-temporal spectrum of shock loading on material behavior under high-strain-rate and on threshold and peculiarities of fracture process can be received under improvement and development of experimental techniques for creation of shock loads with different temporal profiles. The reproducibility of techniques for different experiments play important role in these investigations. The application of electrical explosion of conductors is one of perspective directions for realization of such problems [1]. This technique permits up to 40–50% of provided electrical power to transform to kinetic energy of explosive products.

Bulk metallic glasses are very attractive field for investigations because of their unique chemical and physical-mechanical properties last time. Nevertheless the brittleness of the amorphous materials hinders their broad application [2, 3]. The different specimens of the amorphous alloy with the same

composition can have essentially different plasticity levels depending on cooling velocity under crystallization, presence of nanocrystalline phase, concentration of the free volume.

The investigation of the bulk metallic glass behavior under high-strain-rate was the aim of this work. It was developed technique using the electrical explosion of conductor phenomenon for the shock load generation in solids [1]. This method permit to extend essentially the changing range of the shock load parameters. The application of the modern interferometric methods for checking of the load parameters and the metallographic investigations of the specimen structure before and after shock loading allow to receive considerable information on the development of deformation processes, structure kinetics and fracture of the materials under high-strain-rate.

Material behaviors under conditions of high strain rates are of practical importance with the rapid development of military and aerospace technology. Bulk metallic glasses (BMGs), as a class of advanced structural and functional materials, which possess a combination of outstanding properties including ultrahigh strength, high hardness, large elastic limit, unique fracture toughness, and excellent corrosion resistance [2–3], have gradually gained considerable attention from materials science community. It should be of scientific and technological interest to probe the deformation behaviors of BMGs under plate impact loading in order to shed lights on the high strain-rate response of this advanced materials and for their great potential applications, such as kinetic energy penetrators.

I. Dynamic behavior of bulk metallic glass on the base of Ti

Authors [4] studied the shock wave response of (Hf,Zr)-based bulk amorphous alloy specimens subjected to peak stresses of 4–16 GPa in plate impact experiments and their response was compared to a previously studied Zr-based BMG and reported that the (Hf,Zr)-based BAA displayed a Hugoniot elastic limit (HEL) of 7.4 GPa corresponding to an elastic strain of 4.3%. Turneure and his co-workers [5,6] reported that the HEL stress of $\text{Zr}_{56.7}\text{Cu}_{15.3}\text{Ni}_{12.5}\text{Nb}_{5.0}\text{Al}_{10.0}\text{Y}_{0.5}$ BMG was determined to be 7.1 ± 0.3 GPa and 8.97 ± 0.61 GPa in [7]. In [5] a Zr-based BMG subjected to uniaxial tensile strain in plate-impact experiments under compressive loading with peak stresses ranging between 3.9 and 6.1 GPa, in the result of wave interactions produced tensile loading leading to spallation in the BMG samples. Tensile fracture or spall, observed in these experiments, was initiated at a tensile stress of 3.8 ± 0.3 GPa and 3.6 ± 0.1 GPa in [7]; this value was independent of the impact stress and is significantly higher than that observed for crystalline metals. T. Mashimo with co-authors [8] stated the HEL stress of $\text{Zr}_{55}\text{Al}_{10}\text{Ni}_5\text{Cu}_{30}$ BMG was 6.2 GPa. The Hugoniot elastic limits were determined to be 6.9 to 9.6 GPa [9]. Yuan *et al.* [10] conducted plate-impact experiments to investigate the shock response of a Zr-based BMG, in the normal stress range of 5–7 GPa. The HEL of the BMG was estimated to be 6.15 GPa. The above experiments are of importance to understand the equations of state (EOS), constitutive equations and damage mechanism of bulk glass-forming alloys upon dynamic loading. However, very limited data are currently available for the dynamic compression properties of Ti-based bulk glassy alloys.

In this paper, shock wave compression experiments were performed on the $\text{Ti}_{40}\text{Zr}_{25}\text{Ni}_3\text{Cu}_{12}\text{Be}_{20}$ BMG in order to gain better understanding of the response features upon shock loading. Recovery experiment was also carried out in order to investigate the structure of shock-compressed samples.

In the present work, the shock responses of $\text{Ti}_{40}\text{Zr}_{25}\text{Ni}_3\text{Cu}_{12}\text{Be}_{20}$ bulk metallic glass (BMG) were investigated by using a planar impact technique on an electrical explosion of conductor (EEC) installation. The spallation occurs even if the stress behind the shock front is less than the Hugoniot elastic limit (HEL) stress of the Ti-based BMG. When the velocity of aluminum flyer with thickness of 1.7 mm is 570 m/s, the spall strength of the alloy sample is 2.9 GPa while the stress, strain and particle velocity behind the shock front are 4.3 GPa, 2.8% and 150 m/s, respectively. The calculated yield strength for the alloy upon the dynamic loading is much larger than that under the quasistatic compressive loading. The microscopy observation indicates that, after

dynamic loading, the free surface of the sample exhibits formation of a lot of shear bands and cracks. Optical microscope shows that cracks and microvoids, which caused the occurrence of the spallation of the sample, are distributed on the cross-section of the recovered Ti-based BMG sample.

1.1 Experimental

Alloy ingots with the nominal composition $\text{Ti}_{40}\text{Zr}_{25}\text{Ni}_3\text{Cu}_{12}\text{Be}_{20}$ (at. %) were prepared from a mixture of constituent elements with purities better than 99.9% (wt. %), by non-consumable arc melting under a Ti-gettered argon atmosphere. To ensure composition homogeneity, each ingot was remelted at least four times. Bulk glassy samples were prepared by remelting the button ingots and drop casting the molten alloy into a copper mold with an internal cavity of $3 \times 30 \times 80$ mm³. The structure of the plate-shaped samples were identified by X-ray diffraction (XRD) using the Cu K α radiation [3].

Before dynamic compression experiments elastic characteristics for the glass were measured. Density, ρ_0 , of the sample was measured by an Archimedeian method and averaged over several samples cut from different positions of each plate. Longitudinal C_l and transverse C_t wave velocities were determined by testing the acoustic signals oscillograms in glassy samples. Elastic constants of the glass were calculated and listed in Table 1 [3].

Table 1
Density and elastic characteristics for $\text{Ti}_{40}\text{Zr}_{25}\text{Ni}_3\text{Cu}_{12}\text{Be}_{20}$ bulk metallic glass

ρ_0 , g/cm ³	C_l , m/s	C_t , m/s	E , GPa	K , GPa	G , GPa	ν
5.44 ± 0.01	5295 ± 10	3180 ± 30	134	79	55	0.218

here K is the bulk modulus, G is the shear modulus, E is the elastic Young's modulus, and ν is the Poisson ratio.

The dynamic strength investigations of the bulk glassy samples were performed by plane plate impact technology on an electrical explosion of conductor installation (EEC). The glass samples were in the form of plate with a size of $3 \times 30 \times 30$ mm³ and the flyers were in the form of a disk, 20 mm in diameter and 1.7 mm in thickness. The parameters of EEC are as follow: capacitance C is 6 μf , voltage U is 50 kV, total energy E is up to 7.5 kJ, short circuit duration T is 11 μs . Velocities of the aluminum impactor range from 250 to 750 m/s, controlled by a differential laser interferometer. Plasma energy generated by explosion of conductors is used for projectile acceleration, allowing the investigations of submicrosecond shock duration within a velocity rate of 1000~1500 m/s. The scheme for spall testing is presented in Fig. 1. The fracture morphology of

the tested samples was examined by microscopy using Axio-Observer Z1 M microscope to reveal the deformation and fracture mechanism.

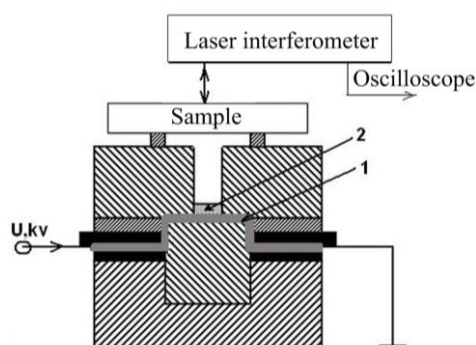


Fig. 1. Schematic illustration of the set-up for spall strength investigation: 1 – exploding foil (aluminum foil with dimensions $0.01 \times 20 \times 50$ mm³); 2 – plate-flyer from aluminum alloy with dimensions $\varnothing 20 \times 1.7$ mm³ [3]

1.2 Results and Discussion

Fig. 2 shows the XRD pattern of the $\text{Ti}_{40}\text{Zr}_{25}\text{Ni}_3\text{Cu}_{12}\text{Be}_{20}$ alloy, which consists of only a typical broad diffused peak. No evidence of any Bragg crystalline peaks can be observed from the XRD pattern within the detectable limitation of the XRD, typical of a glassy nature.

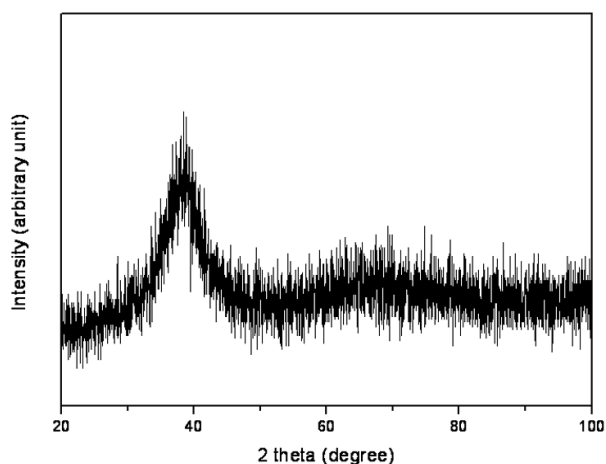


Fig. 2. XRD pattern for the as-cast $\text{Ti}_{40}\text{Zr}_{25}\text{Ni}_3\text{Cu}_{12}\text{Be}_{20}$ bulk glassy sample [3]

Fig. 3 shows the interferogram and the corresponding velocity profile at the free surface for $\text{Ti}_{40}\text{Zr}_{25}\text{Ni}_3\text{Cu}_{12}\text{Be}_{20}$ BMG samples impacted by Al flyer at the impact velocity of 570 m/s. As can be seen from **Fig. 3**, the free surface particle velocity firstly raised to 300 m/s without a kink, suggesting that only elastic shock wave propagated within the sample and the stress behind the shock front was lower than the HEL stress. Then the free surface particle velocity rap-

idly dropped down to 90 m/s, followed by a small fluctuation, indicating the occurrence of spallation within the sample under dynamic loading.

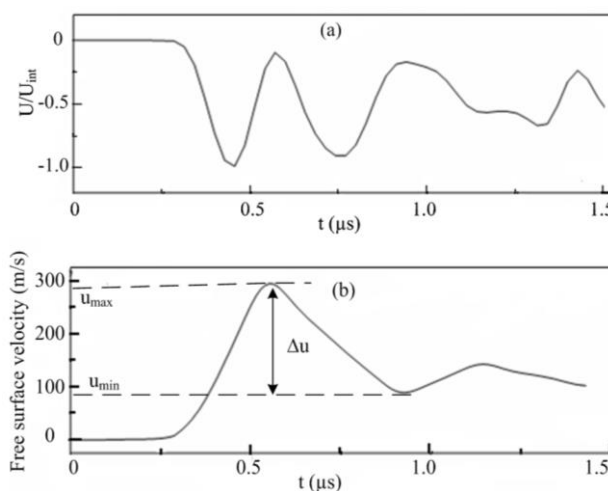


Fig. 3. Interferogram (a) and corresponding free surface velocity profile (b) obtained for $\text{Ti}_{40}\text{Zr}_{25}\text{Ni}_3\text{Cu}_{12}\text{Be}_{20}$ glassy samples impacted by Al flyer at the impact velocity of 570 m/s [3]

Fig. 4 shows a schematic of wave propagation in the flyer and the target BMG sample (t - X diagram) for a typical plate-impact spall experiment. The horizontal coordinate represents the distance in the target and the flyer from the impact surface, while the longitudinal coordinate represents the time after impact. As shown in **Fig. 4**, upon impact, compressive waves are generated in both the target and the flyer plates. After reflected from the free surface of the flyer or target BMG, compressive waves would change into the rarefaction waves and propagate to an opposite direction. When the rarefaction waves reflected from the free surfaces of the flyer and the sample interacts at a pre-determined location, A, within the BMG sample, the sample begins to subject to tensile stress. As we know for a material when the tensile stress reaches a level beyond its ability to resist fracture, it fails in a process known as spallation (Region 7). The material's spall strength can be calculated by the following equation:

$$\sigma_{spall} = \frac{1}{2} \rho_0 C_l \Delta u \quad (1)$$

where Δu can be calculated by the difference between the free surface particle velocity u_{max} and u_{min} , which can be obtained from free surface velocity profile shown in **Fig. 3b**. According to Eq. (1), the corresponding value of spall strength for $\text{Ti}_{40}\text{Zr}_{25}\text{Ni}_3\text{Cu}_{12}\text{Be}_{20}$ glassy samples can be estimated to be 2.9 GPa.

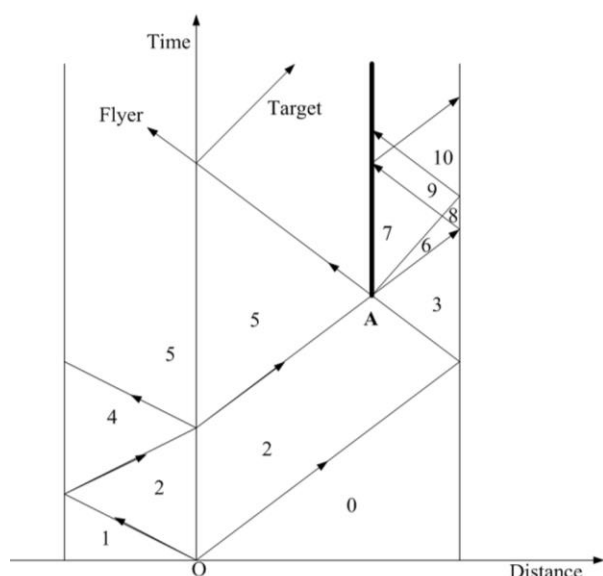


Fig. 4. Wave propagation in the flyer and the target BMG sample ($X-t$ diagram) for a typical plate-impact spall experiment. The arrows indicate the direction of wave propagation [3]

When the stress behind the shock front is less than the HEL stress of the material, the shock wave velocity could be replaced with the longitudinal wave velocity of the material. The stress and the strain behind the shock front can be evaluated by the below relations:

$$\sigma_x = \rho_0 C_l u \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{u}{C_l} \quad (3)$$

where u is the particle velocity behind the shock front which is equal to half of the maximum free surface particle velocity. The corresponding values for σ_x and ε are 4.2 GPa and 2.7 %, respectively.

Using the von Mises yield criterion, the yield strength, Y_0 , under uniaxial stress loading can be readily computed by the following expression:

$$Y_0 = \frac{1-2\nu}{1-\nu} \sigma_{HEL} \quad (4)$$

Considering that σ_x is below the HEL stress of the material in this study, replacement of σ_{HEL} with σ_x into equation (4) gives:

$$Y_0 > \frac{1-2\nu}{1-\nu} \sigma_x \quad (5)$$

Using the ambient value of ν , accordingly, Y_0

of the glassy alloy studied is larger than 3.0 GPa. For comparison, the quasistatic compression tests on the Ti-based alloy with the same composition gives $Y_0 = 1.8$ GPa [11]. Such discrepancies in the yield strength obtained from different types of loading have been previously observed in Zr-based glass, for which the yield strength obtained from plate impact experiments (uniaxial strain) and quasistatic compression experiment (uniaxial stress) are 2.83 and 1.9 GPa, respectively [12, 13]. HEL and yield stress in a ternary BMG, $Zr_{50}Cu_{40}Al_{10}$ are determined as 6.8 GPa and 2.8 GPa, respectively [14].

After the dynamic loading experiment, the soft-recovered samples were observed under microscopy. **Fig. 5** shows the typical micrograph for free surface of the shocked sample. Many cracks and shear bands can be observed on the free surface of the shocked sample. The similar phenomenon - multiple parallel shear bands oriented at 45° to the loading direction were observed on the surfaces of the deformed specimens $Zr_{41.5}Ti_{13.5}Cu_{12.5}Ni_{10}Be_{22.5}$ BMG [15]. The formation of the shear bands and cracks on the free surface of the shocked sample is caused by the shear localization within the sample during the shock loading.

To characterize the damage area around the spall plane of the $Ti_{40}Zr_{25}Ni_3Cu_{12}Be_{20}$ BMG, the cross-section of the shocked samples were observed. **Fig. 6** shows the typical cross-section optical microscope image of the recovered Ti-based BMG sample. Cracks, which lead to the occurrence of the spallation, can be clearly seen in the damage area around the spall zone. Careful examination reveals that the cracks are formed due to the coalescence of microvoids, as it is seen in **Fig. 6** similar data presented in [16], where fracture occurs mostly through the growth and coalescence of damage cavities. Therefore, the spall plane was formed due to the growth and coalescence of those microvoids.

Based on the free volume theory and Spaepen's model [17–18], one can conclude that the free-volume concentration is strongly sensitive to the strain rate, i.e. increasing strain rate could result in an significant increase in the free-volume concentration. Under the shock wave loading, a large number of free volumes would be created in the amorphous alloy due to extremely high strain rate (higher than 10^4 s^{-1}). The free volumes in the pre-determined location, A, as marked in **Fig. 4**, where the rarefaction waves interacts, would spontaneously coalescence to microvoids due to the tensile stress. The local increase in microvoids has been suggested as the main mechanism for nucleation of cracks. Once the cracks nucleate, they will propagate rapidly, therefore, causing the spallation of the sample. Thus, lots of microvoids and cracks could be seen in the damage area around the spall plane of the sample.

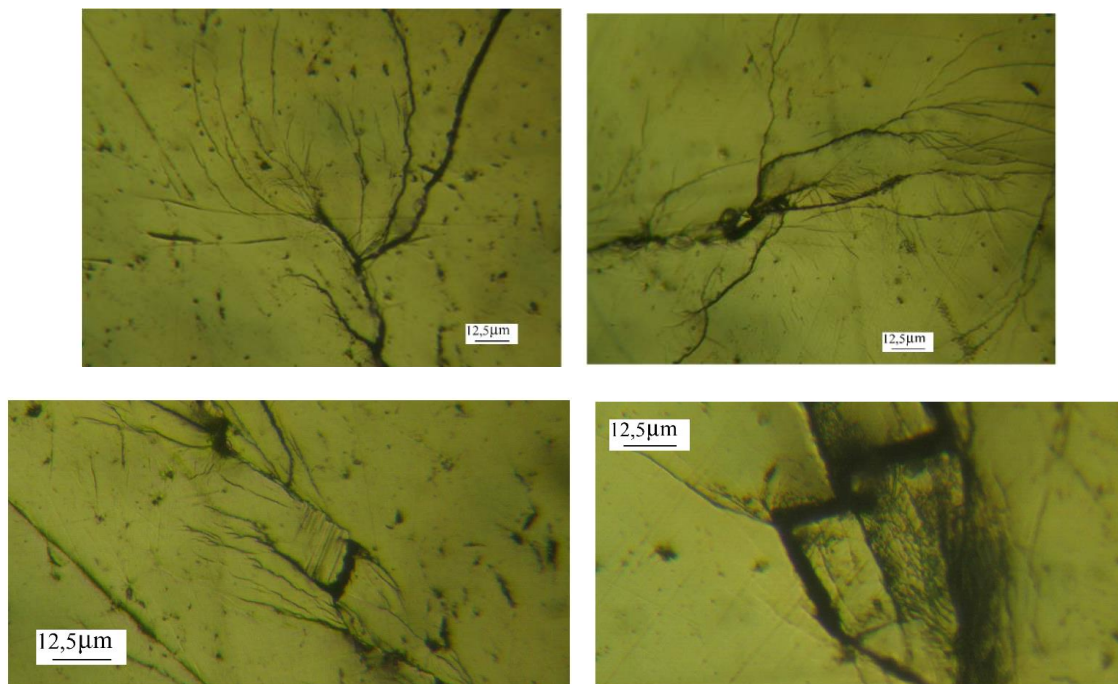


Fig. 5. Typical free-surface micrograph of the recovered $\text{Ti}_{40}\text{Zr}_{25}\text{Ni}_3\text{Cu}_{12}\text{Be}_{20}$ BMG sample after shock loading

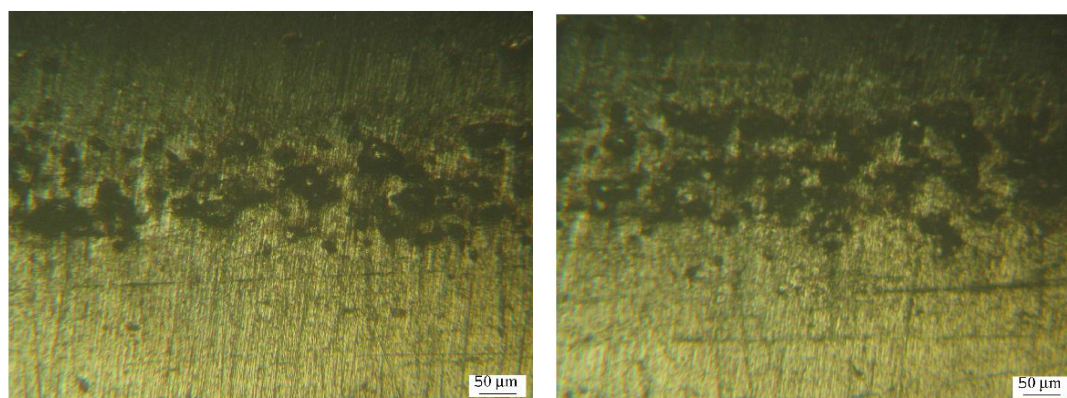


Fig. 6. Typical cross-section optical micrograph of the recovered $\text{Ti}_{40}\text{Zr}_{25}\text{Ni}_3\text{Cu}_{12}\text{Be}_{20}$ BMG sample showing the damage area around the spall zone

1.3. Conclusions

From the results discussed above, several conclusions can be drawn as follows:

- (1) Spallation of the Ti-based bulk metallic glass in dynamic loading occurs prior to yielding.
- (2) The yield strength of the Ti-based metallic glass under the dynamic loading is larger than the reported quasistatic value.
- (3) Cracks and microvoids, which caused the occurrence of the spallation of the sample, are distributed on the cross-section of the recovered Ti-based BMG sample.

II. Dynamic behavior of bulk metallic glass on the base of Zr

The purpose of this study is to experimentally investigate the deformation and microstructural

changes of Zr-based bulk metallic glass (BMG) under high-strain-rate.

2.1. Experimental procedure

The investigation of the dynamic properties for metallic glass was carried out using the electrical explosion of conductors installation with following parameters: capacitor $C = 6 \mu\text{f}$, voltage U up to 50 kV, stored energy $E \leq 7.5 \text{ kJ}$, short-circuit duration $T = 10.5 \mu\text{s}$ [2].

The technique for the creation of shock load was developed: direct or via plate-waveguide loading of the specimens by shock wave under foil explosion. The temporal dependence of the specimen free surface velocity at the outlet of the pressure pulse on the surface has been checked with the help of the differential laser interferometer (delay time $\tau = 0.4 \text{ ns}$) [19, 20].

Fig. 7 shows the chart of the technique using symmetry of the foil explosion which permits to receive the information about shock load parameters both at the front and in the back specimen surface with good accuracy.

Specimens were in the form of plates with dimensions $\varnothing 30 \times 3$ mm. Specimens were prepared by arc melting and continuous casting.

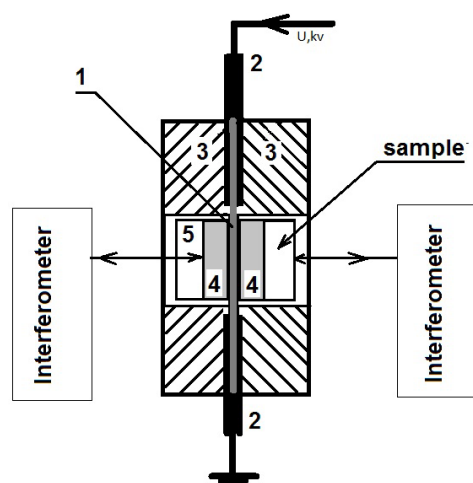


Fig. 7. Shock wave loading by foil explosion: 1 – aluminum foil $0.03 \times 20 \times 35$ mm, 2 – electrodes, 3 – the frame from dielectric, 4 – waveguide (ceramic, polymer), 5 – optical window (PMMA, quartz glass, sapphire) [2]

The movement velocities of free surfaces for waveguide and specimens were monitored using differential interferometers. Exploding aluminum foil was placed between two ceramic waveguides $\varnothing 35$ mm in diameter and equal thickness, the optical glass and specimen were in acoustic contact with these waveguides on different sides from them. This technique permitted to define with good accuracy both the moment of the specimen loading and the starting load parameters. At the same time this technique could determine the load transformation under pulse passing across the specimen.

2.2 Results and Discussion

Experimental investigations of the behavior of the amorphous metallic glass on the base of Zr under shock loads of $0.5 \mu\text{s}$ duration in the pressure range ≤ 12 GPa could be carried out due to developed techniques.

Preliminary velocities of elastic waves were measured in metallic glasses specimens with the help of optical-acoustic technique [21] and elastic modulus was calculated (Table 2). For comparison, this table also shows the data for the metallic glass on the base on titanium.

The results of measurements and calculations

Amorphous alloys	ρ , g/cm ³	C, m/s	C _t , m/s	E, GPa	G, GPa	ν
Ti ₄₀ Zr ₂₅ Ni ₃ Cu ₁₂ Be ₂₀	5.44 ± 0.01	5295 ± 10	3180 ± 30	134 ± 3	55 ± 1.5	0.218
ZrNiCuAl	6.810 ± 0.005	4900 ± 10	2360 ± 20	102 ± 2	38 ± 1.0	0.349

Temporal profiles of the free surface velocity under different loading intensities are presented in Fig. 8.

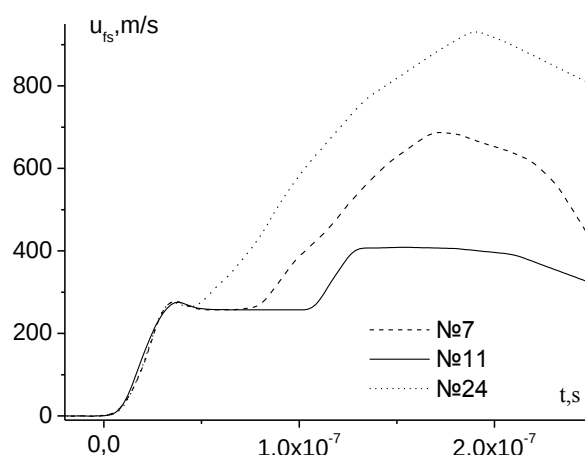


Fig. 8. Temporal profiles of the free surface velocity for specimens from ZrNiCuAl alloy under different intensity of the loading. The dotted line shows the profile of mass velocity of particles at the boundary of the ceramic waveguide and the optical window

It is clearly seen two-wave structure of the wave typical for elastic-plastic response of the materials. Still further this structure is specific for almost ideally plastic response. It follows from the presence of practically horizontal part of the profile after loading front. It is seen the specific tooth of flow. Dynamic elastic limit determined in the experiments is equal $\sigma_{HEL} = 4.57 \pm 0.05$ GPa and spall strength for ZrNiCuAl alloy is equal $\sigma_{sp} = 4.43 \pm 0.05$ GPa. The spall strength was calculated by the method based on the difference between the peak velocity and the first minimum in the free surface velocity profiles and the product of the initial density and longitudinal wave speed [20].

The parameters of the shock Hugoniot adiabat in the space of velocity of the shock wave U_{sh} and the particle velocity u_p are presented in Fig. 9.

Several U_s - U_p curves of Zr based BMGs reported in literatures [7]. It can be seen that a kink appears at particle velocity $380 \text{ m/s} \sim 660 \text{ m/s}$ (pressure range $14 \text{ GPa} \sim 26 \text{ GPa}$) for Zr-based BMGs, and for Zr₅₇Nb₅Cu_{15.4}Ni_{12.6}Al₁₀ BMG, a second kink appears at 1.7 km/s . In present experiments a kink appears at lower particle velocity $\sim 180 \text{ m/s}$.

Microstructural examination of samples after high-strain-rate showed that the free surface cracks have an oval semi-closed form, forming a chain (Fig. 10a). Also, on the free surface of the sample multiple deformation bands placed parallel each other are seen (Fig. 10b – in polarized light). Shear bands are typical for the microstructure of the shock loaded Zr based BMG material.

In the test modes, the material is characterized by the appearance of specific areas of localization of deformation in the form of increased etched regions as it shown in Fig.10 (c, d).

The cross-section shows typical spall split (Fig. 11a), perpendicular to the wave propagation direction or spall zigzag split (Fig. 11b), placed at an angle of 45° to the direction of wave propagation.

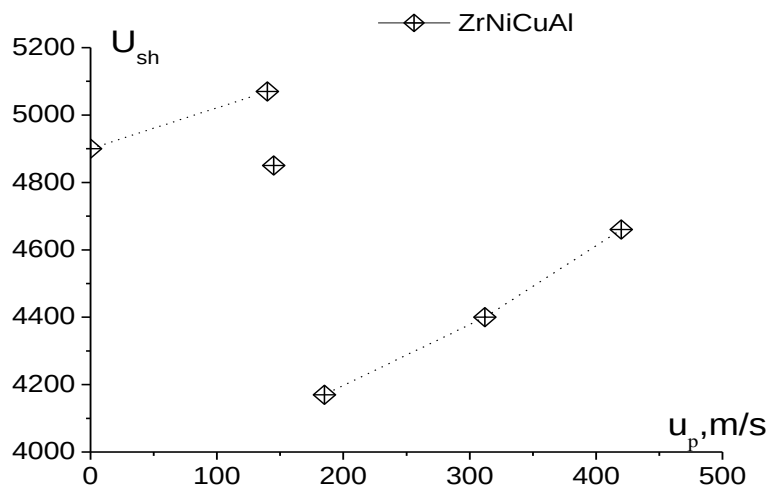
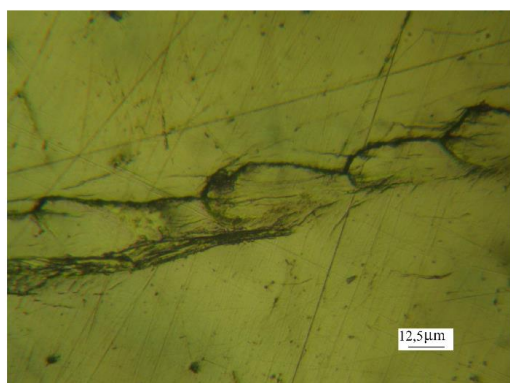
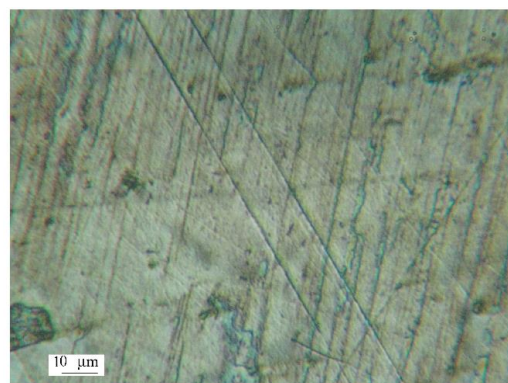


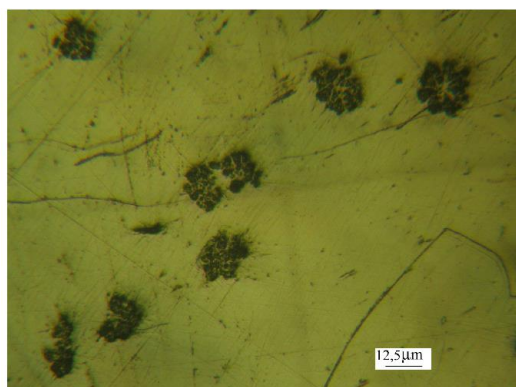
Fig. 9. Dependence $U_{sh} = f(u_p)$ for ZrNiCuAl alloy



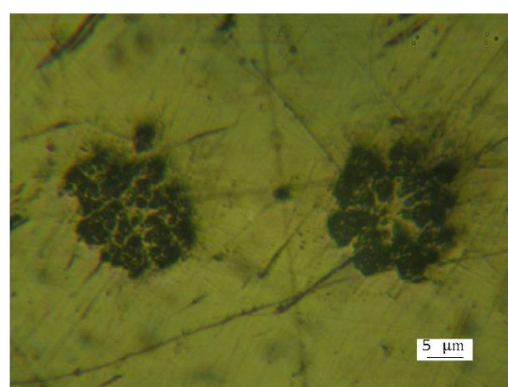
a



b



c



d

Fig. 10. Free surface of ZrNiCuAl shock loaded specimens

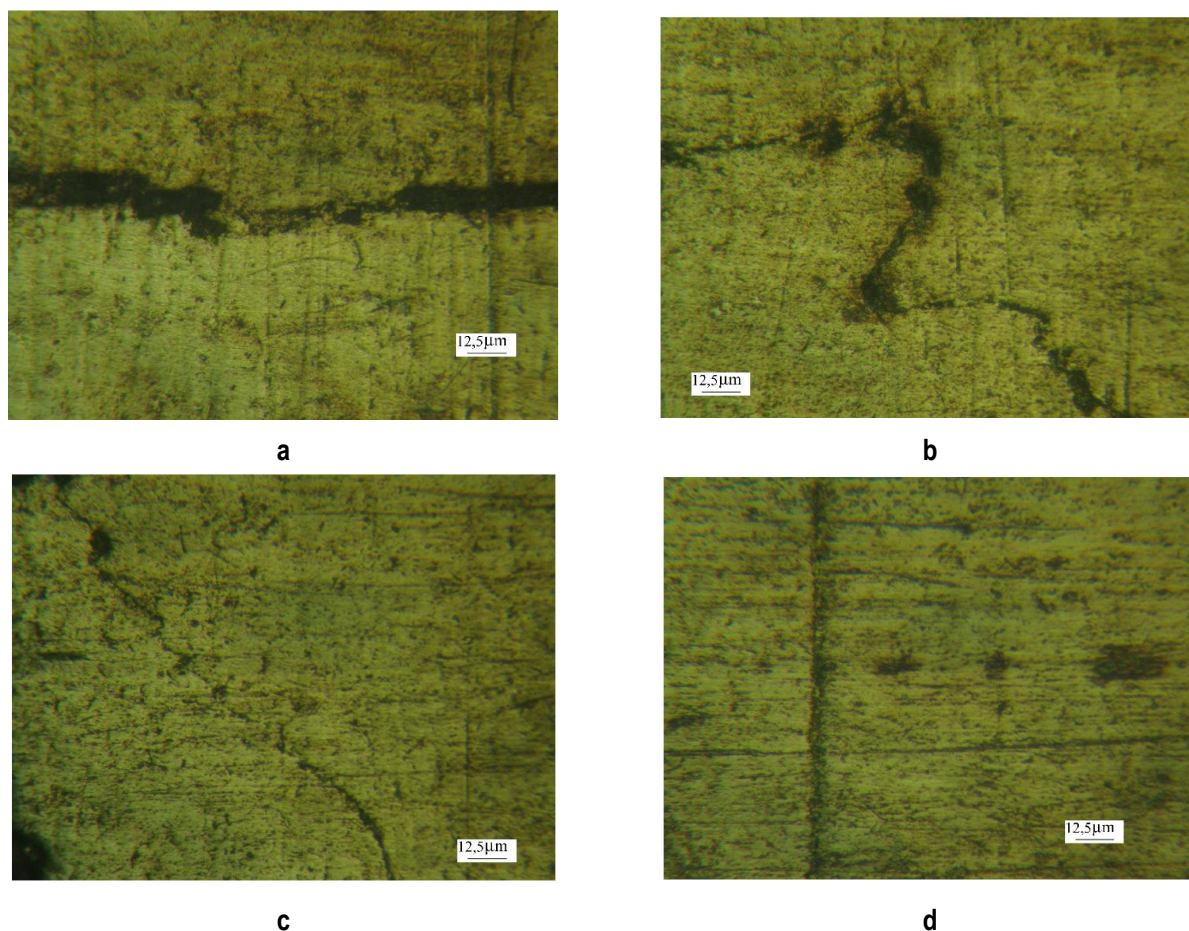


Fig. 11. Microstructure of the cross-section for ZrNiCuAl BMG shock loaded specimens

The shear bands are arranged in the wave propagation direction (**Fig. 11d**), and at a certain angle (close to 45°).

Microstructural studies of the samples showed the presence of non-etched areas with fine-grained structure. In these areas under shock loading the conditions necessary for the occurrence of dynamic recrystallization are created. Near free surface of the specimen, i.e. in the region of high strain rate, it is seen in polarized light the areas of dynamic recrystallization (white in **Fig. 12**) consisting on nanocrystals [22]. Figure 12a presents the cluster of recrystallization areas near the free surface. Typically, recrystallization region in the samples of the material have a shape close to a circle (**Fig. 12b**). At the same figure it is seen shear bands along the wave propagation direction (**Fig. 12a**).

The presence of localized shear bands and areas of recrystallization can be conditioned by the sufficiently great amount of free volume (i.e., structural defects), which is formed in the manufacture of the specimens [17, 18]. The localization of defects leads

to the formation of zones with the different material parameters and hence to the nucleation of shear bands and to the transformation of the grains.

Mescheryakov and Atroshenko et al. [22, 23] have shown that in the field of shear localization can be quite large absolute values of shear strain and significant, although insufficient to melt, rise of temperature. So in the fields of the shear localization can be expected the processes with formation of the new crystal structure.

XRD analysis of samples №11 and №17 showed (**Fig. 13, Table 3**) that the appearance of the crystallized structure is observed: a sample №11 – 4,6% of crystals, in a sample №17 – 0.7%. At the same time the increasing of the percentage of crystallinity leads to decreasing of the average size of the zones of recrystallization (the average size of the regions of recrystallization for sample number 11 is 9.7 microns, and for the sample №17 is 16,0 microns). Also, one can see an increase in the values of microhardness for sample №11 $HV = 3758$ MPa and sample №17 – $HV = 3438$ MPa.

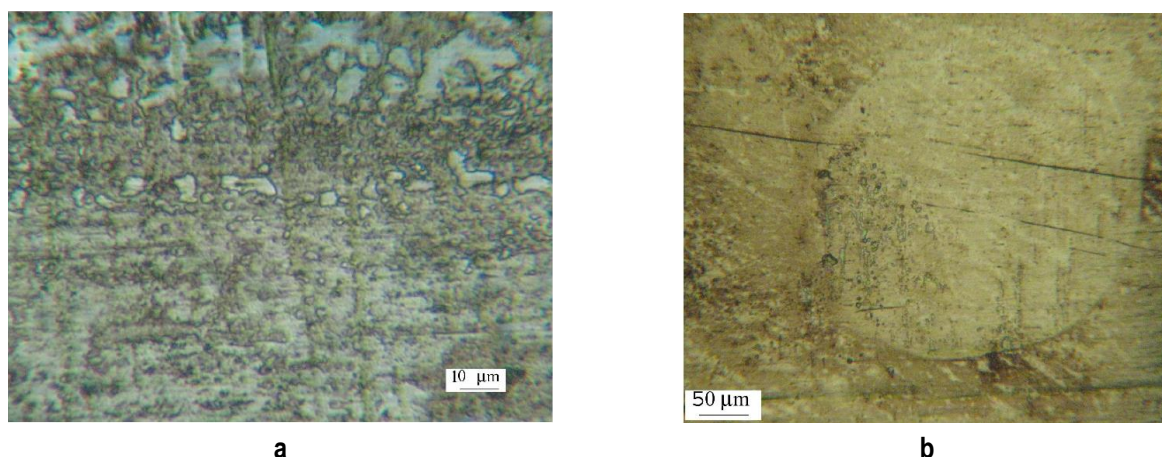


Fig. 12. Dynamic recrystallization in cross-section of the ZrNiCuAl specimens after shock loading: a) nucleus; b) "pancake" pocket of the nanocrystallization

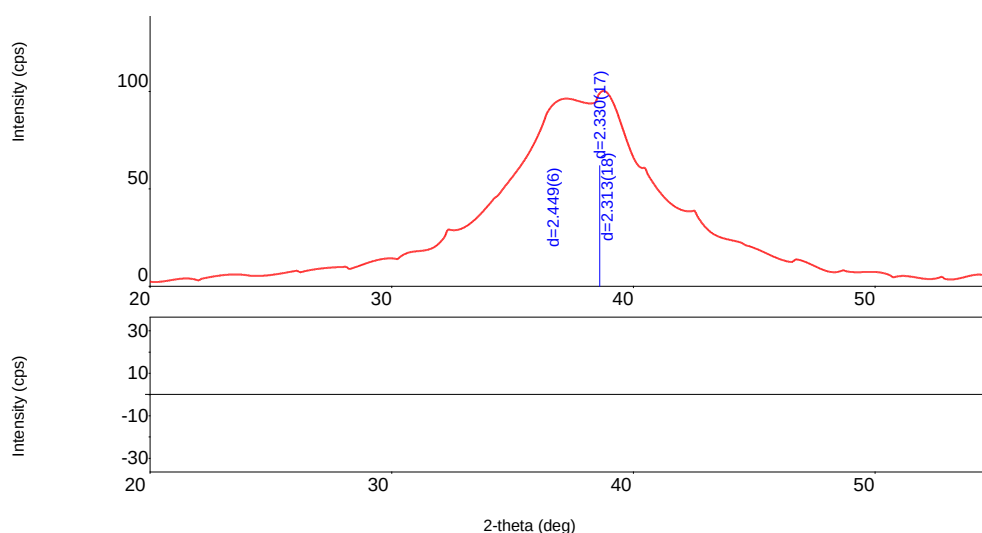


Fig. 13. X-ray measurement profile for specimen №11

Table 3
Dependence of crystallinity quantity in shock loaded specimens on microhardness and dynamic recrystallization areas

Sample №	% of the crystallinity	HV, MPa	Size of areas of dynamic recrystallization, μm		
			Average	Minimum	Maximum
11	4,6%	3758	9,4	2,9	79,6
17	0,7%	3438	16,0	3,7	49,4

2.3. Conclusions

From the above results one can draw the following conclusions:

The investigations of amorphous metallic alloys on the base of Zr justified the qualitative picture for response of these materials on shock loading.

It was found that for our alloy composition on the base of Zr the HEL value σ_{HEL} and spall strength σ_{sp} are 4.57 and 4.43 GPa correspondingly. Nevertheless,

despite the value of the spall strength of less than HEL on the fracture surface are observed local regions with shear bands and grains of recrystallization.

The experimental results indicate a complex deformation process during shock compression.

Acknowledgements

Work was financially supported by RFBR projects № 16-01-00638, 16-51-53006 NSFC and by St. Petersburg State University (Project no. 6.39.319.2014).

References

1. Berezin, G.V., Sudenkov, Yu.V. Investigation of shock waves from the electrical explosion of conductors on the dynamic response of solid barriers, *Physical mechanics*, 4, 119, 1980 (in Russian).
2. I. Smirnov, Atroshenko S., Yu. Sudenkov, N. Morozov, Wei Zheng, N. Naumova, Jun Shen. Dynamic properties of bulk metallic glass on the base of Zr. Shock Compression of Condensed Matter – 2011, Proceedings of the Conference of the

- American Physical Society Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter held in Chicago, Illinois, USA June 26 – July 1, 2011. American Institute of Physics Melville, New York, 2012, pp. 1121–1124
3. S.A. Atroshenko, N.F. Morozov, W. Zheng, Y.J. Huang, Yu.V. Sudenkov, N.S. Naumova, Jun Shen. Deformation behaviors of a TiZrNiCuBe bulk metallic glass under shock loading. *Journal of Alloys and Compounds* 505 (2010) 501–504
 4. Jaglinski, T.; Turneaure, Stefan J.; Gupta, Y. M., Effect of compositional variation on the shock wave response of bulk amorphous alloys. *Journal of Applied Physics*, Volume 112, Issue 6, pp. 063529-063529-8 (2012)
 5. S.J. Turneaure, S.K. Dwivedi and Y.M. Gupta. Shock-wave induced tension and spall in a zirconium-based bulk amorphous alloy. *J. Appl. Phys.* 101, 043514 (2007)
 6. S.J. Turneaure, J.M. Winey, Y.M. Gupta. Response of a Zr-based bulk amorphous alloy to shock wave compression. *J. Appl. Phys.* 100 (2006) 063522
 7. Binqiang Luo, Guiji Wang, Fuli Tan, Jianheng Zhao, Cangli Liu, and Chengwei Sun. Dynamic behaviors of a Zr-based bulk metallic glass under ramp wave and shock wave loading. *AIP ADVANCES* 5, 067161 (2015)
 8. T. Mashimo, H. Togo, Y. Zhang, Y. Uemura, T. Kinoshita, M. Kodama, Y. Kawamura. Hugoniot-compression curve of Zr-based bulk metallic glass. *Appl. Phys. Lett.* 89 (2006) 241904
 9. Feng Xi, Yuying Yu, Chengda Dai, Yi Zhang and Lingcang Cai. Shock compression response of a Zr-based bulk metallic glass up to 110 GPa. *J. Appl. Phys.* 108, 083537 (2010)
 10. F.P. Yuan, V. Prakash, J.J. Lewandowski. Spall Strength of a Zirconium-based Bulk Metallic Glass. *Proceedings of the XIth International Congress and Exposition June 2–5, 2008 Orlando, Florida USA*. 2008. Society for Experimental Mechanics Inc.
 11. Huang, Y. J., Shen, J. and Sun, J. F. Bulk metallic glasses: smaller is softer, *Applied Physics Letters*, vol. 90, 081919, 2007
 12. S. J. Turneaure, J. M. Winey and Y. M. Gupta. Compressive shock wave response of a Zr-based bulk amorphous alloy. *Appl. Phys. Lett.* 84, 1692 (2004)
 13. Z.F. Zhang, F.F. Wu, G. He, J. Eckert. Mechanical properties, damage and fracture mechanisms of bulk metallic glass materials. *J. Mater. Sci. Technol.* 23 (2007) 747
 14. L. Lu, C. Li, W.H. Wang, M.H. Zhu, X.L. Gong, S.N. Luo. Ductile fracture of bulk metallic glass Zr50Cu40Al10 under high strain-rate loading. *Materials Science & Engineering A* 651 (2016) 848–853
 15. J. Lu and G. Ravichandran. Pressure-dependent flow behavior of $Zr_{41.2}Ti_{13.8}Cu_{12.5}Ni_{10}Be_{22.5}$ bulk metallic glass, *Journal of Materials Research*, 18, 2039-2049 (2003)
 16. E. Bouchaud, D. Boivin, J. L. Pouchou, D. Bonamy, B. Poon and G. Ravichandran, *Fracture through cavitation in a metallic glass*, *Europhysics Letters*, 83, (2008)
 17. Frans Spaepen, David Turnbull The activation volume of the diffusivity in amorphous metals. *Scripta Metallurgica et Materialia* Volume 25, Issue 7, July 1991, Pages 1563–1565
 18. F. Spaepen, A microscopic mechanism for steady state inhomogeneous flow in metallic glasses. *Acta Metall.* 25 (1977) 407. Volume 25, Issue 4, April 1977, Pages 407–415
 19. Barker, L.M., and Hohenbach, R.E., “Interferometer technique for measuring the dynamic mechanical properties of materials”, *Review of Scientific Instruments*, 36, 1617, 1965.
 20. Zlatin, N. A., Mochalov, S. M., Pugachev, G. S., and Bragov, A. M., “Time dependence of the process of metal failure under intensive loads”, *Fiz. Tverd. Tela*, 16(6), 1753, 1974 [in Russian].
 21. Sud'enkov, Yu.V., and Sazhko, Z.A., “Acoustooptic Spectroscopy of Metal Structure Modifications under Plastic Deformation Due to Submicrosecond Impulsive Shock Loading”, *Technical Physics*, Vol. 48, N1, 125, 2003
 22. Atroshenko, S.A., “Shock-Induced Dynamic Recrystallization in Metals”, in *Recrystallization and Grain Growth* (eds. Gottstein, G. and Molodov, D.A., Springer-Verlag), 2001.
 23. Mescheryakov, Yu.I., and Atroshenko, S.A., “Dynamic recrystallization in shear bands”, in *Metallurgical and Materials Applications of Shock-Wave and High-Strain-Rate Phenomena* (Eds. L.E. Murr et al Elsevier Science, Amsterdam), 1995, 443–450.

Материал поступил в редакцию 26.01.16.

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-1-69-78

ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЪЕМНОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО СТЕКЛА ПРИ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ

Атрошенко С.А.

Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. На основе электрического взрыва проводников разработан метод высокоскоростной деформации материалов для исследований динамической прочности при ударных нагрузках микросекундной и субмикросекундной длительности. Проведены экспериментальные исследования динамических характеристик объемного металлического стекла на основе титана и циркония при ударных нагрузках субмикросекундной длительности (~0.5–0.7 мкс) в диапазоне давления до 12 ГПа. Для этих аморфных сплавов получены

значения предела упругости Гюгонио и предела прочности на растрескивание. Определены параметры ударной адиабаты Гюгонио в пространстве $U_{sh} - u_p$. В результате анализа микроструктуры сохранных образцов выявлены области рекристаллизации.

Ключевые слова: объемное металлическое стекло, ударное нагружение, электрический взрыв проводников, динамическая прочность, предел упругости Гюгонио, предел прочности на растрескивание.

Atroshenko S.A. Behaviors of bulk metallic glass under shock loading // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14. №1. С. 69–78. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-1-69-78

Atroshenko S.A. Behaviors of bulk metallic glass under shock loading. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 1, pp. 69–78. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-1-69-78

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

UDC 620.2

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-1-79-87

HOT SHORTNESS CRACKS FORMATION IN A LOW ALLOY STEEL: INVESTIGATION ON THE CRITICAL CONDITIONS

Brunelli K., Bruschi S., Ghiotti A., Lencina R., Dabalà M.

Università di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale, Padova, Italy

Abstract. In this work the effect of the temperature on the growth of the shortness cracks and consequently on the mechanical properties of a 20Mn4 steel was studied. Uniaxial tensile tests were carried out on the thermo-mechanical simulator Gleeble 3800™ in a range of temperatures between 1000° and 1280°C. Heat treatments at different temperatures and holding times were performed in a tubular furnace.

After the tensile test and the heat treatments, the samples were characterised by secondary electron microscopy in order to evaluate the effect of microstructural evolution on the hot shortness behaviour. The copper agglomeration at the metal/scale interface is mainly responsible for the hot shortness phenomenon: for a characteristic range of temperature, a copper enriched liquid phase penetrates along grain boundaries promoting crack formation and hot shortness behaviour.

Keywords: Steel, heat treatments, hot-shortness, mechanical properties, microstructural evolution.

Introduction

Surface Hot Shortness (H-S) is caused by the enrichment of residual elements during oxidation that can give rise to a liquid phase, which subsequently weakens austenite grain boundaries. H-S is not a new problem; it has been known since the early 1900, and the topic arose again in the late 1950 and 1960, when the increasing of the electric arc furnace steel production has led a constant growth of copper amount in the final product. The results of the research showed that copper was the main element responsible of the formation of surface cracks or “surface cracking” [1]. At the end of the 70’s the main mechanism of the hot shortness was explained by the diffusion of the copper in the steel during heat treatment [2].

The H-S behaviour is defined as the embrittlement of the metal in the field of the hot working, and it occurs mainly in steels containing traces of elements nobler than iron and with low melting point, in particular copper [3]. At temperatures higher than 400°C, the oxide scale of the steels is formed by three continuous and compact

layers: hematite, magnetite and wustite. In these conditions the nobler alloying elements remain unoxidized and concentrate at the steel/oxide interface, where they form low melting zones, which are responsible of the so called heat embrittlement in the material structure.

In copper containing steels, oxidized at temperature higher than 900°C, large areas of Cu were found at the steel/oxide interface. The H-S in these steels is caused by the penetration of the liquid Cu into the cracks (Cu is completely liquid at 1100°C) at the surface or along grain boundaries and it depends strongly on the temperature, time, residual elements concentration and atmosphere [4, 5].

The characteristics and causes of the H-S phenomenon take different connotations: at lower temperatures the hot-shortness depends only on the rate and the intensity of the scale formation on the material surface, whereas at higher temperatures, the process of occlusion of Cu into the scale is more relevant, and the hot-shortness depends mainly on of copper content [6–9].

According to Salter, the main factors that influence the evolution of the H-S phenomenon, excluding the steel oxidation rate, are in order of im-

portance: copper solubility in austenite, penetration of the molten copper phase along grain boundary (wettability), and temperature of diffusion of the copper enriched phase [9–12].

In this work, the operative conditions were selected for the realization of tests in order to determine the conditions which are useful to block the formation of copper rich phases and/or to minimize the phenomenon of copper enrichment at grain boundaries and. The tensile tests at elevated temperature were conducted in order to evaluate the effects of the microstructural changes on ductility characteristics of the investigated steel.

Experimental

The material studied in this work is a 20Mn4 steel commonly employed for structural application. It was supplied as round bar (60 mm diameter). The chemical composition of the steel is reported in **Table 1**.

The copper content in this steel is 0.33% wt%, but the effect of copper is increased by the presence of Sn, according to the Eq. 1 [13]:

$$\%Cu_{eq} = \%Cu_{real} + K \cdot \%Sn_{real} \quad (1)$$

where $\%Cu_{eq}$ is the “equivalent copper content” and K is a constant between 7 and 10. Assuming an intermediate value of K equal to 8.5, the equivalent copper value corresponds to 0.495 wt%. The presence of Sn diminish copper solubility in steel and thus it promotes the formation of dangerous enriched zones. Moreover, its presence produces the

lowering of the melting point of the enriched copper phase, facilitating the penetration of the molten phase along the grain boundary.

The tensile tests were carried out on the thermo-mechanical simulator Gleeble 3800™ in a range of temperatures between 1000°C and 1280°C. The metal sample was heated up to the testing temperature by Joule effect at 10°C/s, held in temperature for 15 minutes, and then strained until fracture by applying a constant strain rate equal to $10^{-1} s^{-1}$. After testing, the sample was left cooling in calm air. The ductility characteristic chosen as a reference in this study was the total elongation of the sample at fracture.

In order to determine the conditions of temperature, which are useful to minimize the phenomenon of copper enrichment at grain boundaries and to block the formation of copper rich phases, samples of steels underwent heat treatments in a tubular furnace for 60 min in a temperature range of 1000–1230°C in air and in atmosphere with a lower amount of oxygen (15% and 10%) (**Table 2**).

The treatment temperature was reached by a heating rate of 10 °C/min. The samples were cooled in air.

After heat treatments, the cross-section of specimens was included in epoxy resin and polished by metallographic procedures and then characterized by a Cambridge Stereoscan 440 SEM equipped with a Philips PV800 EDAX probe.

Table 1

Chemical composition of 20Mn4 steel (wt%)

C	Mn	S	P	Si	Cr	Ni	Cu	Sn	N	Mo
0.2104	1.044	0.0259	0.0118	0.1699	0.0776	0.0732	0.329	0.0195	0.00113	0.0283

Table 2

Conditions of the heat treatments.

	1000°C	1050°C	1100°C	1140°C	1180°C	1230°C
Air, 60 min	x	x	x	x	x	x
10% O ₂ 60 min		x	x	x	x	x
15% O ₂ 60 min		x	x	x		

Results and discussion

A preliminary characterization of the round bar of the 20Mn4steel was performed before the tensile test and the heat treatments to examine the copper distribution in the structure. In the central areas of the bar, manganese sulphides were found, while copper segregation was not detected. Near the surface of the round bar, small particles of the copper enriched phase were observed at grain boundary. The average size of these agglomerates was in the order of the micron, and their depth from the surface was about 15 μm (Fig. 1). This agglomeration of copper is the consequence of the previous hot working, to which the steel has been subjected to obtain the final shape.

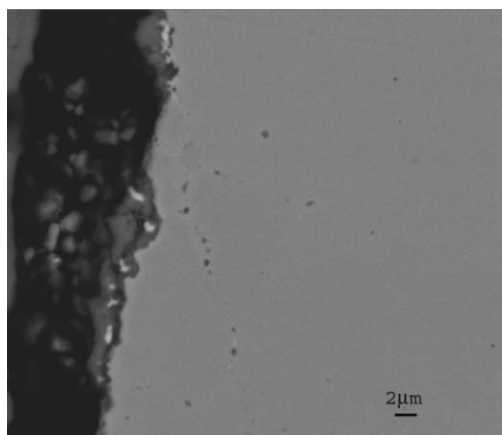


Fig. 1. SEM-BSE image of the section of initial round bar (interface scale-substrate)

Therefore, the samples for all experiments were obtained from the central area of the round bar, where no segregation of copper was detected.

Uniaxial tensile tests

Samples of steel underwent to tensile test at

temperature between 1000°C and 1280°C. The photos of the strained samples are shown in Fig. 2, where it is evident the different amount of post-necking deformation exhibited by the steel at different testing temperatures.

In Fig. 3 the graph of the total elongation of the samples at fracture as a function of the testing temperature is reported: the effect of liquid embrittlement due to presence of copper is well exhibited. As a matter of fact, the steel ductility is drastically reduced at temperatures higher than 1000°C and lower than 1230°C, confirming that above the copper melting temperature the copper enriched phase, which grows at the interface metal/scale, promoted the formation of surface cracks and embrittled the steel structure. At higher temperatures, the oxidation rate is so high that the copper enriched phase is encapsulated on the scale and the metal exhibits higher ductility. However, it was expected higher ductility of the sample heated at 1230°C, but tensile tests were made with higher heating rate which involves a lower sample oxidation. In these conditions the temperature range where the hot shortness is exhibited is shifted at higher temperature.

The SEM-BSE images of the section of the samples submitted to tensile test at the different temperatures are reported in Fig. 4. As expected, at the lowest temperature (1000°C) the sample does not exhibit agglomeration of copper at the interface metal/scale. Increasing the temperature (1140°C and 1230°C) a copper enriched phase (lighter zone) at the interface scale/metal and along grain boundary was detected. Moreover, in the sample tested at 1140°C many intergranular surface cracks, due to the penetration of the liquid along grain boundaries combined with the oxidation of the steel, were observed [4]. At the highest temperature (1280°C) globules of copper were found in the scale.

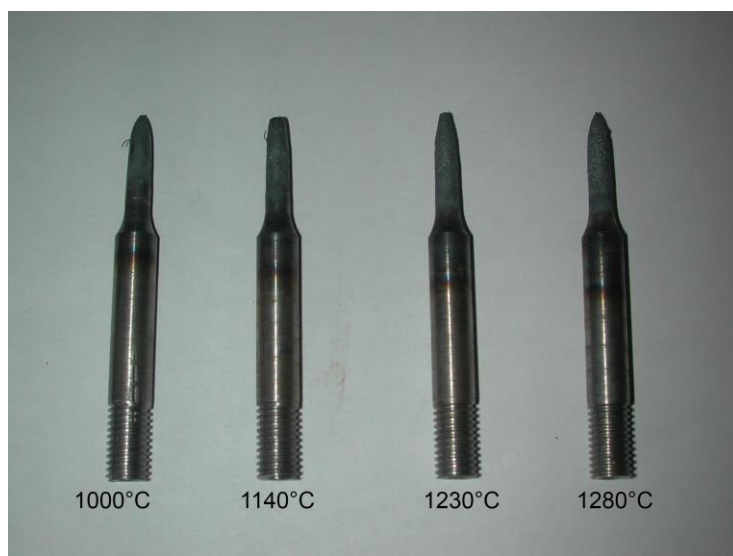


Fig. 2. Image of samples after mechanical tensile test at different temperatures

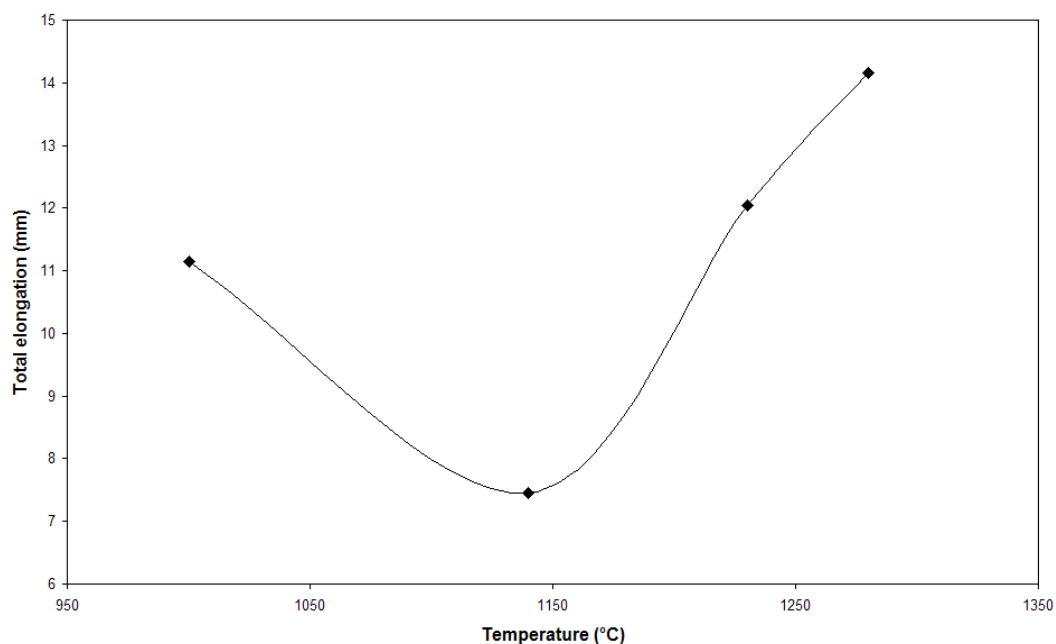


Fig. 3. Graph of the total elongation of the samples at fracture as a function of the testing temperature

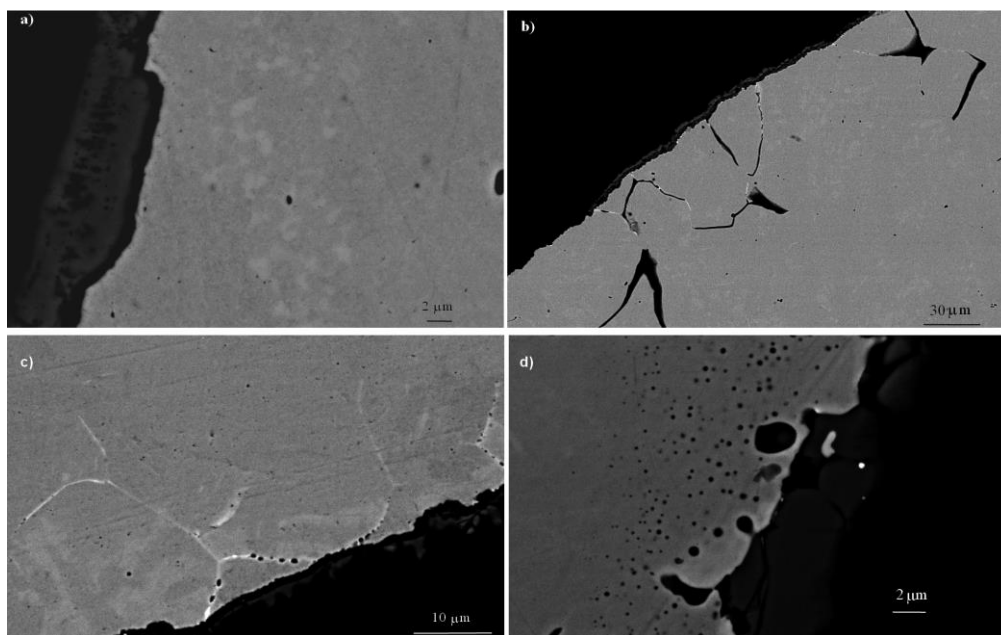


Fig. 4. BSE-SEM images of the section of the samples after mechanical tests at a) 1000°C; b) 1140°C; c) 1230°C; d) 1280°C

Therefore, after the tensile test at elevated temperatures, it is possible to conclude that the hot shortness behaviour in this steel is more pronounced at 1140°C.

For a better understanding of the effect of temperature on the segregation of copper at the surface of this steel, heat treatments at different temperatures, were carried out in a tubular furnace.

Effect of the temperature

The first tests were carried out at 900°C and 1000°C, at which temperatures it is expected the copper enriched phase remains solid, because this temperature

is just lower than the melting point of the copper. As a matter of fact, the SEM analysis revealed that the globules of copper enriched phase were localised inside the scale and distributed parallel to the interface metal/oxide (Fig. 5, Fig. 6). At 900°C it was possible to detect the presence of only some small globules in the scale, while at 1000°C their presence was more pronounced and with higher dimension. In both cases it was not found penetration of copper into the material, since copper enriched phase remains solid during the length time of the treatment. Therefore, the treatments carried out at lower temperatures than the one of en-

riched phase liquefaction would not produce H-S, and thus do not represent a dangerous condition for the steel hot working, in agreement with the results of tensile tests. In fact, the embrittlement under hot working is closely linked to the penetration of the molten phase along the grain boundary and to the formation of aggregates of lens situated at the interface between the metal and the scale, which may transform into molten phase during the treatment. As long as the globules remain occluded in the oxide scale and separated from the metal, the metal is protected by the embrittlement.

In **Fig. 7**, the section SEM-BSE images of the samples surface treated at 1050°C, 1100°C and 1230°C for 60 min are reported. It was observed that after the heat treatment at low temperatures, 1050° and 1100°C, a planar interface metal/scale has developed, while at 1230°C the interface is characterized by a noticeable roughness [14]. In the first case, the copper enriched phase is distributed along the interface and at grain boundary, and it is constituted mostly by pure copper. Moreover, at 1050°C the copper enriched zones was predominant near the oxidized interface

whereas increasing the temperature at 1100°C the agglomeration of copper is more pronounced at the grain boundaries. This behaviour is always inter granular; because the copper rich phase at this temperatures is molten^[15] and it wets the austenitic grain boundary. In fact, it was observed a penetration along the boundaries due to the high diffusivity of the iron in the molten phase of copper, in a similar way as it happens in the alloys FeCu [16]. At 1230°C the interface metal/scale was irregular and copper accumulation near the interface was not detected: the particles of copper enriched phase were occluded inside the scale. These occlusions were also constituted by a significant amount of nickel (**Fig. 7d**). At this temperature the oxidation rate was higher, therefore the oxidised interface was able to occlude the copper enriched phase into the scale before the melting was completed. In addition to the formation of an external scale, the steel was subjected to an internal oxidation behaviour. This behaviour is characterized by the development of a 1–2 µm globular FeO particles along the austenitic grain boundaries.

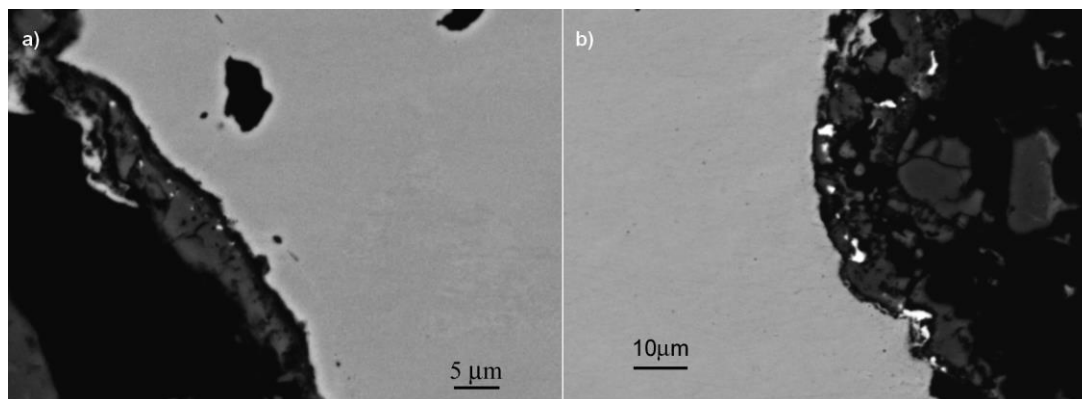


Fig. 5. BSE-SEM image of the section of the sample processed for 1h, in atmosphere with 20% oxygen, at a) 900°C and b) 1000°C

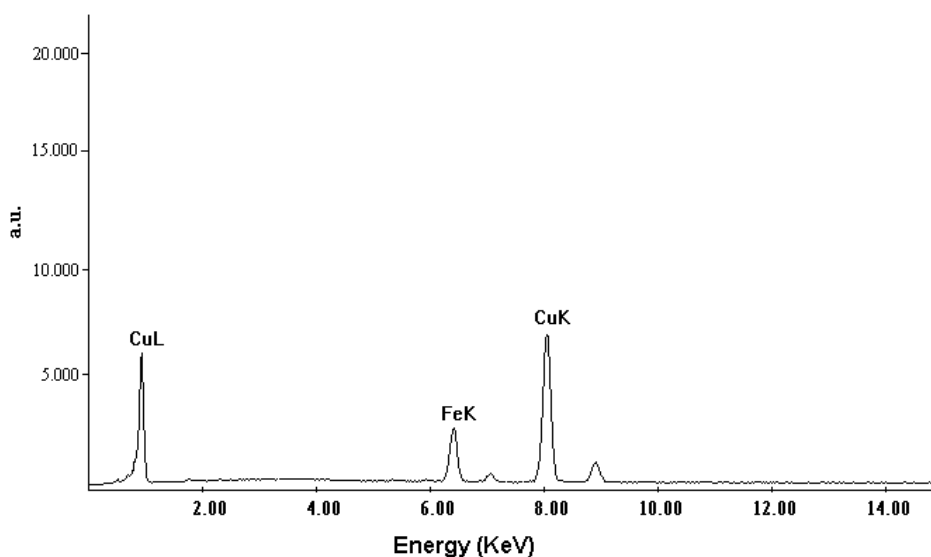


Fig. 6. EDS analysis in correspondence of the white globules in the scale of the sample treated at 1000°C for 1h

At temperature between 1050°C and 1100°C, the formation of small dihedral angles (θ) was observed between the austenitic solid phase and the molten phase, near the triple point.

The value of the dihedral angle θ is function both of the surface tension between the phases and of the wettability between the molten phase and the surrounding solid phases, which induces the so called “intergranular” penetration. [17]. This value can be determined by the equation (2)

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{\gamma_{Fe-Fe}}{\gamma_{Fe-Cu}} = \cos \frac{\theta}{2} \quad (2)$$

where the surface free energy of the austenite grain boundary is denoted by γ_{Fe-Fe} and the surface free energy of the austenite-molten phase boundary is denoted by γ_{Fe-Cu} . The shape of the molten phase adjusts itself such that the surface energy of the system is minimized.

The maximum of H-S is observed for temperatures where the value of θ approached zero, which is the value for complete wettability of the austenitic grain by the liquid copper enriched phase. Moreover, at these temperatures it was observed the highest copper enrichment at the interface metal/scale [9].

Surface tension plays an important role in the H-S embrittlement of steel. The value of the equilibrium dihedral angle depends on the temperatures of treatment, and the minimum value is reached when maximum amount and maximum penetration of the enriched phase along the austenitic grain boundary occur. When combination of maximum amount of molten phase with the deeper penetration of the molten phase along the grain boundaries is obtained, the maximum H-S effect takes place.

The treatments made at lower temperatures of 1050° and 1100°C exhibited the formation of the dihedral angles between the molten phase and the austenite; the penetration of the molten phase appears evident at both temperatures; the molten

phase enclosed completely the first grain beneath the surface.

At 1230°C, the copper enriched phase is instead enclosed in the scale, and shows a globular morphology. There were no signs of penetration along the grain edge. As discussed above, at higher temperatures the high diffusion rate of the copper allowed the migration of copper inside material preventing the formation of the enriched zones near the interface; the part of copper which is not able to diffuse inside of the material is quickly enclosed in the oxide scale. Because the wettability between the oxide and the molten phase is very low, copper and nickel globules appear.

Treatment at intermediate temperature between 1100°C and 1230°C were carried out. At 1140°C, **Fig 8a**, the molten phase forms a semi continuous layer along the interface with a lens morphology, as exhibited in the samples treated at 1100°C. However, a deeper penetration of the molten phase (about 50 μ m) was exhibited along the grain boundary than that detectable at 1100°C and an early stage of entrapment in the inner zone of the oxide scale was observed. The samples treated at 1180°C, shown in **Fig. 8b**, exhibited a reduction of copper enriched zones, either near the interface or in intergranular zone and the presence of globules of copper occluded in the scale. Moreover an increase of the irregularity of the interface metal/scale, due to the higher metal oxidation rate, was observed, with a structure more similar to that one observed at 1230°C. Therefore, the structure obtained at 1140°C was the more prone to induce H-S behaviour, while at higher temperature the increased oxidation rate combined with the higher diffusion rate of the copper allowed the migration of copper inside material and gradually reduces the formation of the enriched zones near the interface, which are the main responsible of H-S behaviour.

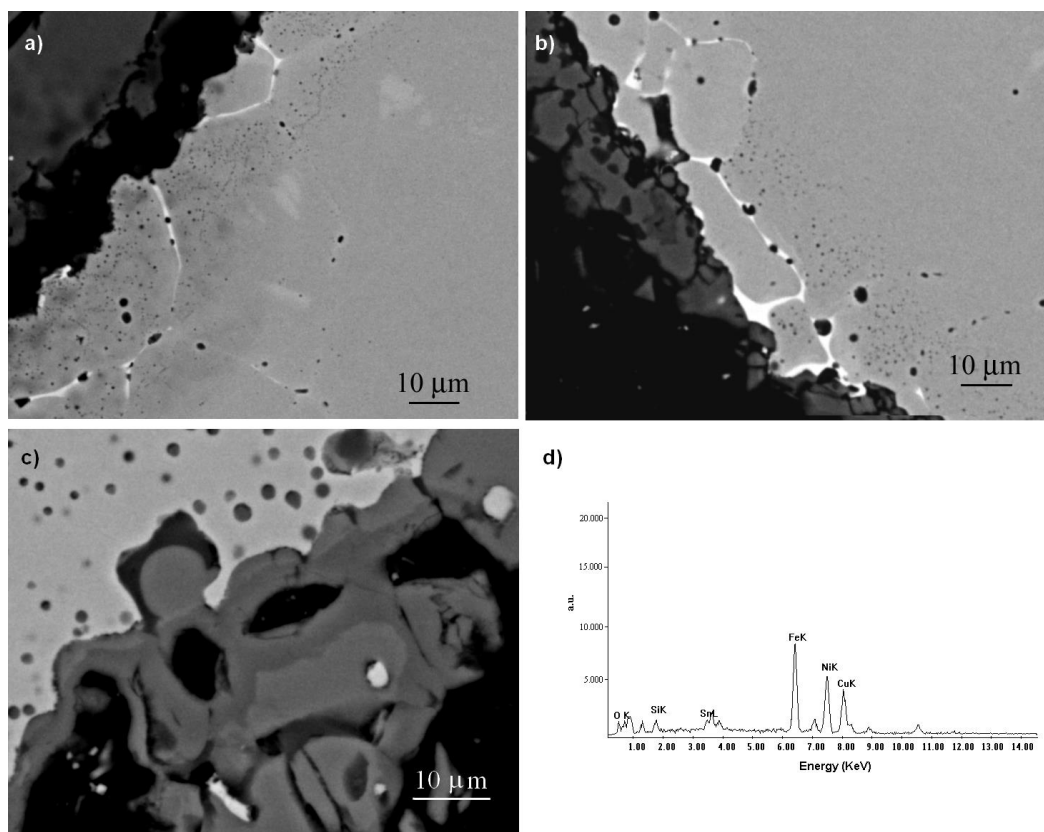


Fig. 7. BSE-SEM images of the section of the samples processed at different temperatures for 1 h: a) 1050°C; b) 1100°C; c) 1230°C; d) EDS analysis in correspondence of the white globules in the scale of the sample treated at 1230°C for 1h

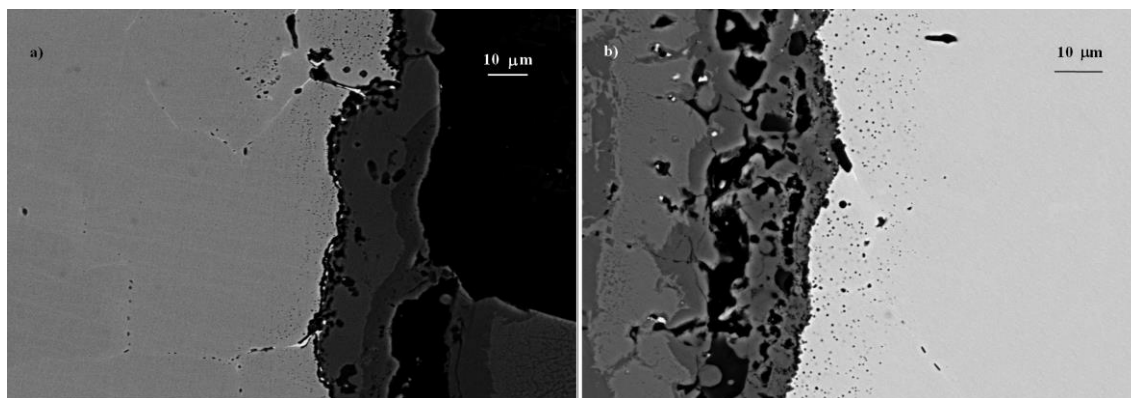


Fig. 8. BSE-SEM images of the section of the sample heat treated for 1h at a) 1140°C and b) 1180°C

Effect of oxygen concentration in treatments atmosphere

The heat treatments in atmosphere with a lower amount of oxygen content (15% and 10%) were carried out at 1050, 1100, 1140, 1180 °C. The reduction of oxygen concentration in the atmosphere produces a reduction of oxidizing rate, with the subsequent reduction of the copper enriched phase penetration. In the sample treated at 1140°C the copper phase developed at the interface, in a globular or lens morphology, but its penetration along the grain boundary is extremely

reduced when atmosphere contains 15% of O₂, and it is negligible at 10% of O₂ (Fig. 9 a, b). From the results of the characterization of the treated samples at lower oxygen content it is possible to assert that when the oxygen content in the atmosphere is reduced the evolution of the molten phase in the material is ascribable at those observed at lower temperature. This is due to a reduced oxidation rate, which depletes the enrichment of copper at the interface and, as a consequence, the penetration of the molten phase along the grain boundaries. Therefore the H-S behaviour was reduced at lower oxygen content in atmosphere.

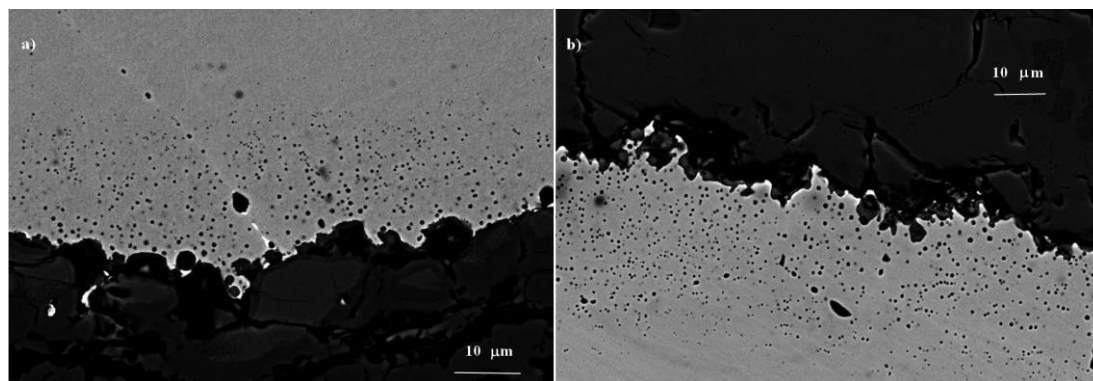


Fig. 9. BSE-SEM images of the sample treated at 1140°C for 1h in atmosphere with
a) 15% oxygen and b) 10% of oxygen

Conclusions

The effect of heating temperature on the embrittlement of a 20Mn4 steel when subjected to hot working was investigated in this work

The presence of copper enriched phases near the surface, especially at the metal/scale interface and at grain boundaries is due to the oxidation process which produces the formation of the surface oxide scale and the penetration along the grain boundaries of the oxide into the steel.

The mechanical tests carried out on the thermo-mechanical simulator Gleeble 3800™ evidenced a lack of ductility of the steel for temperature higher than 1000°C and lower than 1280°C, due to the formation of a layer of copper enriched phase at the metal/scale interface and to its penetration along the grain boundaries.

From the heat treatments in furnace for a time of 1h, it resulted that the copper-rich phase forms at the interface metal/scale at temperature in the range of temperature between 1000°C and 1230°C. At temperature up to 1000°C the copper enriched phase remained on solid state and therefore is entrapped into the oxide scale in the form of globules well distributed on the oxide scale. In these conditions the steel show high ductility and the hot shortness behaviour is not verified. At temperature in the range between 1050–1180°C the copper enriched phase melts and grows at the interface metal/scale and forms a semi-continuous layer. This molten phase penetrates along the grain boundaries into the metal, inducing the formation of globules inside the steel which embrittled the structure and could promote the formation of surface cracks. For temperatures above 1230°C, the oxidation rate is so high to enclose entirely the surface grains and entraps the copper enriched phase. In these conditions the presence of molten copper enriched zones, inside the material structure is strongly reduced and the steel has not been affected by hot shortness.

A reduction in the oxygen content in the atmos-

phere depleted the oxidation rate and the enrichment of copper at the interface and, consequently, the penetration of the molten phase along the grain boundaries. Therefore, in order to limit the impact of hot shortness, the suggested hot working temperature for this steel is over 1230°C. An alternative may be to operate at temperatures lower than 1230°C by reducing the oxygen amount in the atmosphere.

References

1. D.A. MELFORD, Phil. Trans. R. Soc. London A, 1980, 95, 89–103
2. D.A. MELFORD, "Surface Hot Shortness in Mild Steel", J. Iron Steel Inst., 1962, 200, 290–299
3. I. LE MAY, L. MCDONALD SCHETKY, Copper in Iron and Steel, Wiley Interscience Publication, New York, (1982)
4. J.C. HERMAN, V. LEROY, Iron and Steelmaker Vol. 23(12) (1996) p. 35
5. K. YAMAMOTO, H. SHIBATA, S. MIZOGUCHI, Trans. Indian Inst. Met. 2005, 58, 695
6. Metals Handbook, 9th Edition, Vol. 2, Properties and Selection: Non ferrous Alloys and Pure Metals, American Society for Metals (1979)
7. P. ET AL. LEWIS, N. MOORE, P. OLDROYD, An investigation of the formation, constitution and properties of scale formed in the reheating furnace and during the hot rolling process, European Communities, Luxembourg (1997)
8. E. HORNBOKEN, Precipitation from IronBase Alloys, G.R. Speich & J.B. Clark, Eds., p.1, Gordon & Breach, New York (1965)
9. W. J. M. SALTER, J. Iron Steel Inst. 1966, 204; 478
10. S.-J. SEO, K. ASAKURA, K. SJIBATA, ISIJ International, 1997, 37; 240
11. M. DJUROVIC, B. PEROVIC, K. KOVACEVIC, A. KOPRIVICA, M. ANDJELIC, Materials and Technology (Slovenia). 2002, 36; 107
12. C. HOUPERT, M. JALLON, M. CONFENTE, V. LANTERI, J.M. JOLIVET, M. GUTTMANN, J.P. BIRAT, 15th PTD conference proceedings pp 67 (1996)
13. T. ASAI, T. SOSHIRODA, M. MIYAHARA, ISIJ International, 1997, 37; 272
14. B.D. BASTOW, D.H. KIRKWOOD, Journal of the Institute of Metals, 1971, 99, 277
15. H.J. GRABKE, V. LEROY, H. VIEFHAUS, ISIJ International, 1995, 35; 95
16. A. NICHOLSON AND J.D. MURRAY, J. Iron Steel Inst. 1965, 203; 1007
17. Y. KONDO, ISIJ International, 2004, 44; 1576.

Материал поступил в редакцию 26.01.16.

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-1-79-87

**ОБРАЗОВАНИЕ ГОРЯЧИХ ТРЕЩИН В НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ:
ИССЛЕДОВАНИЕ КРИТИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ**

Брунелли К., Бруски С., Джотти А., Ленчина Р., Дабала М.

Департамент индустриальной инженерии Университета г. Падуя, Италия

Аннотация. В работе изучено влияние температуры на рост хрупких трещин и, соответственно, на изменение механических свойств стали марки 20Mn4. На термомеханической моделирующей установке Gleeble 3800™ проведены испытания на одноосное растяжение в диапазоне температур от 1000 до 1280°C. Термические обработки при разных температурах и времени выдержки осуществлялись в трубчатой печи.

После проведенных испытаний на растяжение и термических обработок образцы были проанализированы при помощи растровой электронной микроскопии

для оценки влияния эволюции микроструктуры на протекание горячеломкости. Явление горячеломкости в основном обуславливает скопление меди на поверхности раздела металл-окалина: в характерном диапазоне температуры жидкая фаза, обогащенная медью, проникает по всем границам зерен, способствуя образованию трещин и проявлению горячеломкости.

Ключевые слова: сталь, термическая обработка, горячеломкость, механические свойства, эволюция микроструктуры.

Hot shortness cracks formation in a low alloy steel: investigation on the critical conditions / Brunelli K., Bruschi S., Ghiotti A., Lencina R., Dabalà M. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14. №1. С. 79–87. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-1-79-87

Brunelli K., Bruschi S., Ghiotti A., Lencina R., Dabalà M. Hot shortness cracks formation in a low alloy steel: investigation on the critical conditions. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 1, pp. 79–87. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-1-79-87

UDC 620.2

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-1-87-100

BAINITE STEEL: STRUCTURE AND WORK HARDENINGGromov V.E.¹, Nikitina E.N.¹, IvanovYu.F.^{2,3}, Aksenova K.V.¹, Semina O.A.¹¹ Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia² Institute of high-current electronics SB RAS, Tomsk, Russia³ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Abstract. Using the methods of transmission electron diffraction microscopy, a quantitative evolution analysis of defective and carbide subsystems of medium-carbon steel with a bainite structure under a compression strain up to 36% has been performed. A quantitative analysis of carbon redistribution has been carried out, as well as the dependence established of the concentration of carbon atoms arranged in a crystal lattice of α - and γ -iron on structural defects in cementite particles lying in a number of bainite plates and intra-phase boundaries, and on the degree of deformation.

It has been demonstrated that scalar dislocation density, material volume with deformation twins, a number of stress concentrators, the amplitude of crystal lattice curvature-torsion, the disorientation degree of fragments are increased with the growth of the degree of deformation and average longitudinal fragment sizes are decreased. The long-range stress fields have been estimated. The possible causes of the different stages of parameter changes of the carbide phase and dislocation substructure with deformation have been discussed.

Strengthening mechanisms with the boundaries of the plates and fragments, scalar dislocation density, long-range stress fields, and cementite particles, the interstitial atoms have been estimated. It has been shown that the largest contribution to the amount of work hardening of the steel examined leads to substructural hardening (hardening due to long-range internal stress fields and structure fragmentation) and solid-solution hardening, due to the introduction of carbon atoms into the crystal lattice of the ferrite.

It has been suggested that the cause of softening of steel with a bainite structure at high (over 15%) degrees of deformation is the activation of the process of deformation fine-scale twinning.

Keywords: hardening, bainite, deformation, cementite, dislocation substructure, mechanisms, steel.

© Gromov V.E., Nikitina E.N., IvanovYu.F., Aksenova K.V., Semina O.A., 2016

1. Introduction

Recently the attention of researches in the field of physical metallurgy is paid to the study of features of bainite transformation in steels [1–5]. Steels with bainite structure are widely used in manufacture of large diameter pipes, power engineering, automobile industry, production of rails, etc. [6–10].

Bainite steels, by virtue of transformation $\gamma \rightarrow \alpha$ features, have a complex multiphase structure being formed as a result of superposition of shear and diffusion mechanisms of transformation [11, 12]. The main factors determining properties of bainite structure steel can include: the availability of carbon atoms and other alloying elements in iron crystal lattice; boundaries of grains, packets, crystals of bainite; cementite particles; inclusions of retained austenite; dislocations and internal stress fields caused by structural elements [13–16]. A knowledge of quantitative regularities and mechanisms of work hardening of steel with bainite structure allows to control purposefully the structure-phase states of steel and its mechanical properties [11, 17, 18].

For revealing the promising fields of technologies' application based on plastic deformation following heat treatment it is necessary to study the dependence of hardening effect on structural state of the material and deformation treatment parameters, to establish cause and effect relationships between the phenomena determining the complex improvement of properties [19]. In its turn, a knowledge of regularities of structure formation and steel properties in plastic deformation is necessary for control the process of work hardening.

The characteristics of carbide phase and dislocation substructure are not determined by methods of optical and scanning electron microscopy and can reliably be revealed with application of transmission electron microscopy [11, 20, 21]. Apparent scientific and practical importance of such results is determined by the fact that the understanding of physical nature and basic parameters of formation and evolution of structure-phase states and dislocation substructure is a necessary condition for development of physical material science of bainite steels.

The aim of the research was to investigate the evolution of carbide subsystem, defective substructure, distribution of carbon atoms in structural steel with bainite structure under compression plastic deformation and to reveal the mechanisms of its work hardening.

2. Materials and Methods

Structural steel 30Cr2Ni2MoV was used as a test material [22]. Austenization of steel was done at temperature 960°C during a period of 1.5 hours; cooling was done in air. Deformation of steel was carried out by uniaxial compression of columns $4 \times 4 \times 6 \text{ mm}^3$ in size at a rate $\sim 7 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ on testing machine "Instron-1185". Compression as a method of deformation was convenient to use because, in this case, it was possible to reach the deeper deformations than in extension. Investigations of steel structure and phase composition were performed by methods of electron diffraction microscopy of thin foils [11, 19].

3. Results and Discussion

A characteristic form of curves of steel work hardening is shown in **Fig. 1, a**. Mathematical treatment of curves of work hardening shows that σ – ε relation has a periodic form and is described by polynomial of the fourth power. Differentiation of σ – ε relation curve makes possible to determine the coefficient of steel work hardening $\theta = \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon}$.

When analyzing the results shown in **Fig. 1, b**, two stages of work hardening can be singled out: a stage with parabolic σ – ε relation or decreasing coefficient of hardening Θ and a stage with a slightly changing negative value of coefficient of hardening. Transition from the first stage to the second one occurs in the interval of deformation degree (19...25) %. Failure of steel samples being tested took place at $\varepsilon \approx 0.4$ by brittle cleavage with the formation of some coarse fragments. It is apparent that deformation behavior of samples is conditioned by the change of phase composition and defective substructure of the material.

As a result of bainite transformation on continuous cooling of steel a multiphase structure is formed which is presented by α -phase (solid solution based on *bcc* (body-centered cubic) crystal lattice); γ -phase (solid solution based on *fcc* (face-centered cubic) crystal lattice) and iron carbide (in low- and medium-carbon steels – cementite). The characteristic image of bainite structure of steel 30Cr2Ni2MoV is presented in **Fig. 2**.

Deformation of steel is accompanied by changing the state of carbide phase. The increase in degree of deformation results in reduction of average sizes (**Fig. 3**), density and volume fraction (**Fig. 4**) of iron carbide particles. At the same time the morphology of particles changes. First, their spatial form transforms: initially lamellar particles (ratio of longitudinal sizes (*L*) to transverse ones (*d*) $L/d \approx 8$) transform into ellipsoidal ones ($L/d \approx 5$) (**Fig. 3**, insertion) at the last stage of deformation.

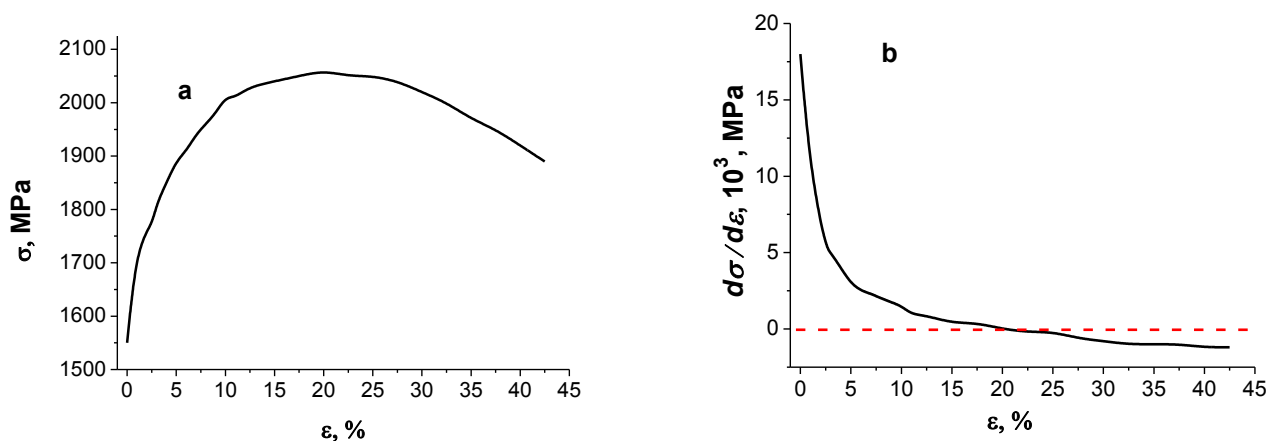


Fig. 1. Strain hardening curve (a) and the dependence of strain hardening coefficient on deformation degree (b) of steel with bainite structure

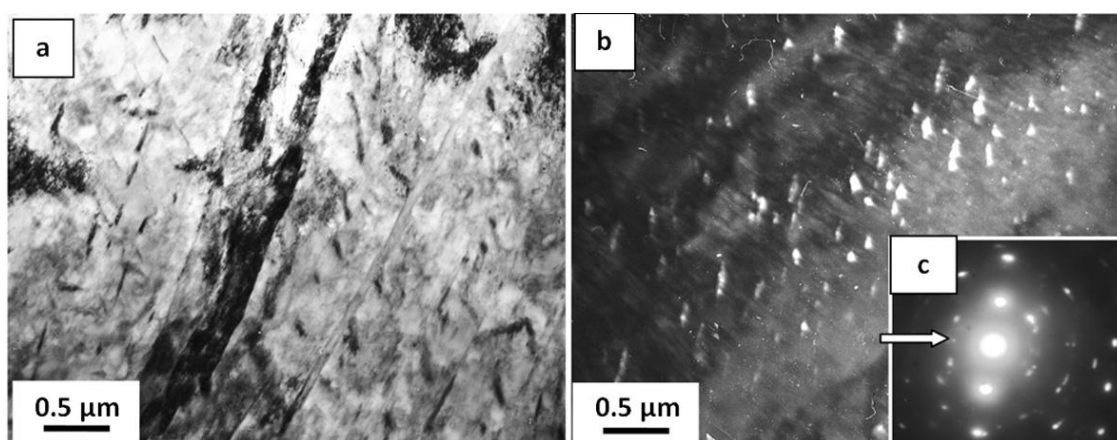


Fig. 2. Electron microscope image of the structure of 30Cr2Ni2MoV steel, formed as a result of cooling from the temperature of austenization; a – light field image; b – dark field, received in reflection $[201]\text{Fe}_3\text{C}$; c – microelectron diffraction pattern, the arrow indicates the reflection, in which the dark field is received

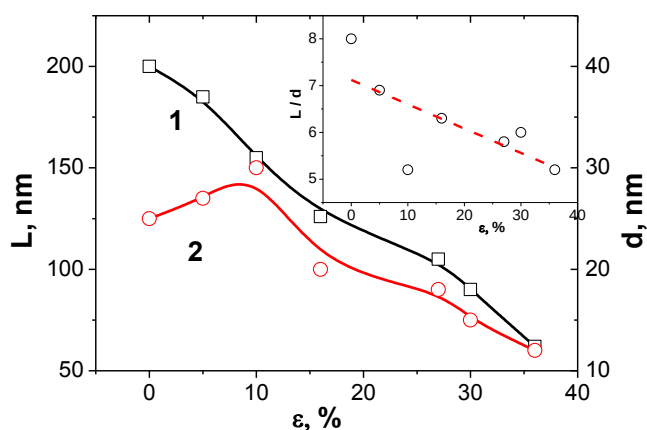


Fig. 3. Dependence of longitudinal L (curve 1) and transverse d (curve 2) dimensions of cementite particles, located in the volume of bainite crystals on deformation degree of steel ε

Second, place of location of cementite particles changes: with the increase in degree of deformation the volume fraction of particles located on the boundaries of bainite plates increases markedly (Fig. 4, curve 1).

The behavior of total volume fraction of cementite (Fig. 4, curve 3) is noteworthy. The initial stage of deformation ($\varepsilon \approx 10\%$) is accompanied by the increase in total fraction of cementite particles in steel; at large degrees of deformation the volume fraction of cementite in steel decreases. It is clear that the increase in total fraction of cementite particles under small degrees of deformation is connected with transformation of retained austenite with formation of cementite initiated by deformation of steel. In fact, the carried out electron microscopy diffraction patterns have revealed the fact of rapid

decrease in volume fraction of retained austenite already at low ($\varepsilon \approx 10\%$) degrees of steel deformation (Fig. 4, b).

Third, inside of bainite crystals (on dislocations and boundaries of fragments) the particles of round shapes whose quantity increases with the growth of deformation degree are detected (Fig. 5).

The discovered quantitative regularities of changing the parameters of steel structure in the process of plastic deformation enabled the investigations directed to the analysis of carbon atom distribution in the structure of the deformed steel to be carried out.

Estimates of relative content of carbon atoms on structural elements of steel were carried out using the expressions generalized in Table. 1. The results of the carried out estimates are given in Fig. 6.

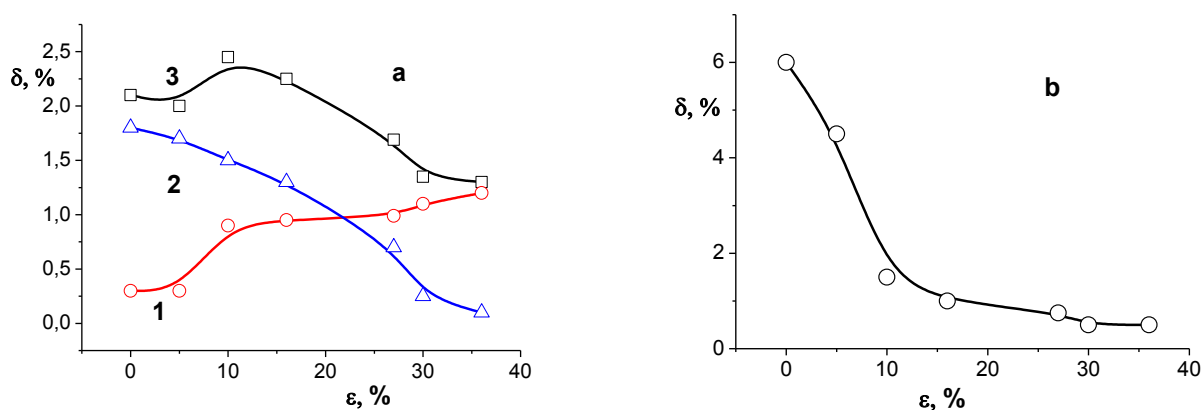


Fig. 4. Dependence of volume fraction of cementite particles (a) and retained austenite layers (b) on deformation degree of steel ε ; curve 1 – cementite particles, located on the boundaries of ferrite crystals, curve 2 – in ferrite crystals; curve 3 demonstrates the changes of the total volume fraction of cementite in steel

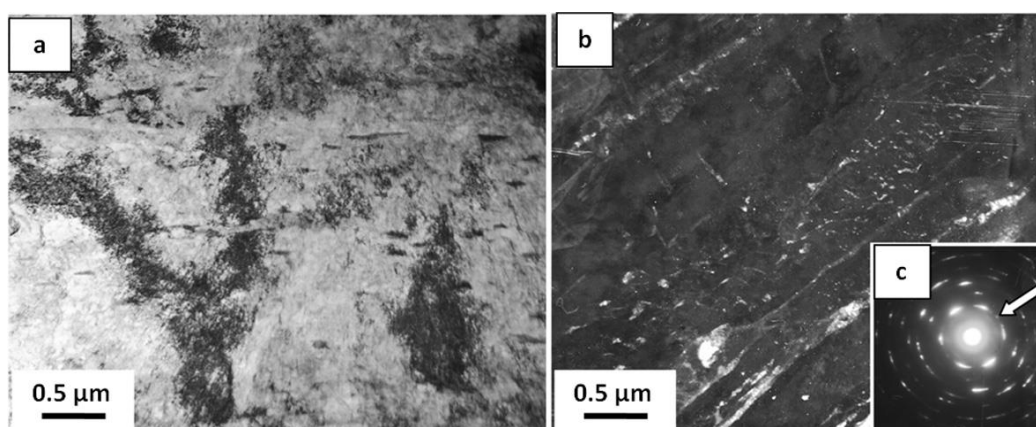


Fig. 5. Electron microscope image of 30Cr2Ni2MoV steel structure, subjected to an uniaxial compression at $\varepsilon \approx 36\%$; a – light field image; b – dark field, received in reflection $[211]\text{Fe}_3\text{C}$; c – microelectron diffraction pattern, the arrow indicates the reflection, in which the dark field is received

Table 1

Method of analysis of carbon distribution in steel

Regions of carbon locations	Estimate expression
Solid solution based on α -iron	$\Delta C_{\alpha} = \Delta V_{\alpha} \frac{a_{\alpha} - a_{\alpha}^0}{39 \pm 4} \cdot 10^3 *$
Solid solution based on γ -iron	$\Delta C_{\gamma} = \Delta V_{\gamma} \frac{a_{\gamma} - a_{\gamma}^0}{44} \cdot 10^3$
Particles of carbide phases	$\Delta C_{\kappa} = \Delta V_{\kappa} \cdot k; k(Fe_3C) = 0,07$
Elements of defective structure	$\Delta C_0 = C_0 - (\Delta C_{\alpha} + \Delta C_{\gamma} + \Delta C_{\kappa})$

*Here ΔV_{α} , ΔV_{γ} , ΔV_{κ} – volume fraction α - γ -Fe and carbide phases, respectively; a_{α} , a_{γ} – present parameter of lattice of α - and γ -phase, respectively; $a_{\alpha}^0 = 0,28668nm$, $a_{\gamma}^0 = 0,3555nm$; C_0 – average content of carbon in steel.

The carried out estimates showed that with the increase in degree of deformation the quantity of carbon atoms located in solid solution based on α -iron (**Fig. 6**, curve 1), in cementite particles lying on intraphase boundaries (**Fig. 6**, curve 2), and those located on defects of crystal structure (**Fig. 6**, curve 3), increased. The quantity of carbon atoms forming cementite particles lying in the volume of bainite plates (**Fig. 6**, curve 4), and located in solid solution based on γ -iron (**Fig. 6**, curve 5), is reduced. Thus, plastic deformation of steel with bainite structure is accompanied by appreciable redistribution of carbon atoms. If in the initial state the basic quantity of carbon atoms was concentrated in cementite particles, then at the final stage of deformation the preferable location of carbon is crystal lattice based on α -iron.

Martensite (shear) mechanism of ferrite formation leads to the formation of dislocation substructure of net-like type with a relatively high scalar density of dislocations measuring $\approx 7 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ in the tested steel in bainite plates. Plastic deformation of steel leads to the increase in scalar density of dislocations (**Fig. 7, a**). In this case the type of dislocation structure is unchangeable – a net-like substructure is retained.

When analyzing the results shown in **Fig. 7, a**, two sections on the curve dependence of scalar density of dislocations on degree of deformation can be distinguished. On the first section ($0\% < \varepsilon < 18\%$) a linear increase in scalar density of dislocations is observed; on the second section ($18\% < \varepsilon < 36\%$) being equal to the first one in length the

growth of density of dislocations is practically not revealed. This circumstance may be caused by both the difficulty of dislocation substructure analysis at densities of dislocations being larger than $\approx 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, which is due to the overlapping of nuclei of closely-spaced dislocations and the possibility of realization of non-dislocation mechanism of material's deformation.

One of these mechanisms being realized under deformation can be twinning. In fact, the investigations carried out in the research detected the significant increase in volume of the material containing deformation microtwins under degree of deformation exceeding $\approx 18\%$ (**Fig. 7, b**). The characteristic image of steel volume with microtwins of deformation origin is shown in **Fig. 8**.

Elastic stresses taking place in realization of shear mechanism of transformation $\gamma \rightarrow \alpha$ result in not only the formation of substructure with a high scalar density of dislocations but fragmentation of bainite plates as well that is the partition of plates into regions with a low-angular disorientation that are most clearly defined by methods of dark field analysis.

Deformation of steel results in the decrease in average longitudinal sizes of fragments (transverse sizes of fragments are limited by the boundaries of bainite plates and are practically unchangeable under deformation) (**Fig. 9, a**). In this case, several stages are revealed in changing of sizes of fragments: at the first stage this process runs very intensively, at the second stage – significantly slower.

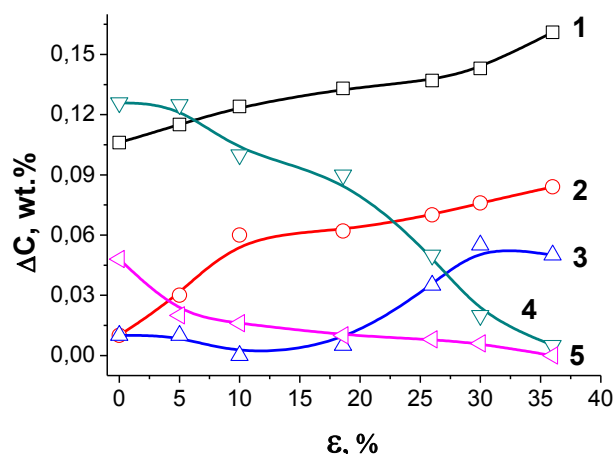


Fig. 6. Dependence of carbon atom concentration, located in a crystal lattice based on α -Fe (1), in cementite particles, lying on the internal phase boundaries (2), on structural defects (3), in cementite particles, lying in the volume of bainite plates (4), a crystal lattice based on γ -Fe (5) on deformation degree

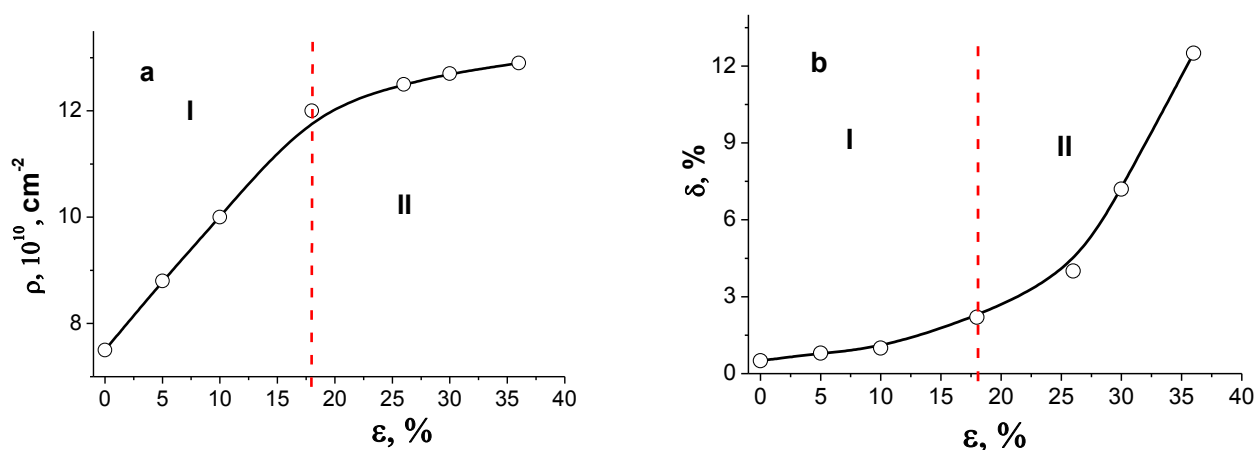


Fig. 7. Dependence of scalar density of dislocations (a) and material volume, containing microtwins (b) on deformation degree

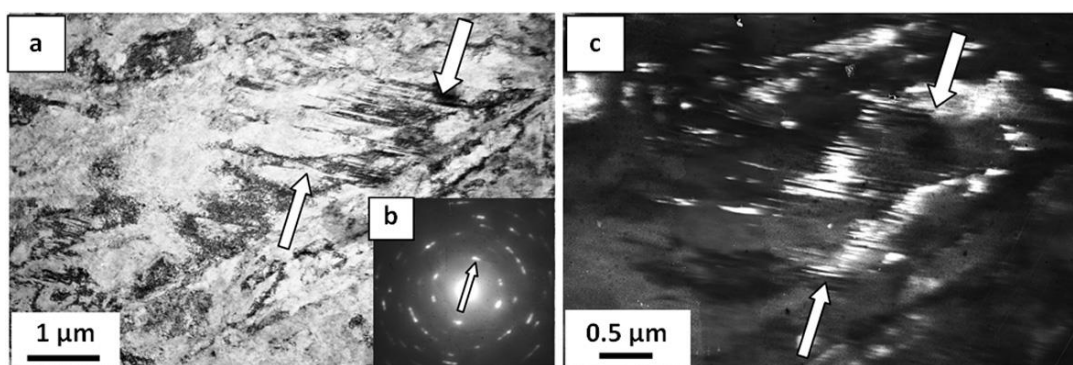


Fig. 8. Electron microscope image of steel structure following deformation $\varepsilon = 36\%$; a – light field image; b – microelectron diffraction pattern; c – dark field, received in reflection $[101]\alpha\text{-Fe}$; the arrows indicate: on (a) and (c) – microtwins of deformation origin; on (b) – reflection, in which the dark field is received

The changing of sizes of fragments goes on the background of increase in degree of their disorientation (Fig. 9, b). Azimuthal constituent of the complete angle of disorientation was determined by the relative value of broadening of reflections of α -phase in accordance with the technique presented in [20]. When analyzing the results shown in Fig. 9, b, three stages of development of the process can be distinguished: at stages I and III the disorientation of substructure elements increases relatively slow, at stage II – it does significantly more intensive.

Deformation of steel is accompanied by the formation of internal fields of stresses that are revealed in analyzing the bend extinction contours by methods of electron microscopy of thin foils [19, 21, 23, 24].

The performed investigations showed that with the increase in degree of deformation the

surface density of contours (Fig. 10, a) (a quantity of contours per unit area of the photograph) enhanced and their average transverse sizes decreased (Fig. 10, b). The first fact is indicative of the increase in number of stress concentrators in the material with rise of degree of deformation, the second one – the rise of amplitude of curvature-torsion of crystal lattice of the material and internal long-range fields of stresses, respectively [19, 21, 23, 24]. Simultaneously with it the shape of contours and their arrangement in bainite plates changes. If in the initial state and at low degrees of deformation the contours arranged predominantly transverse to the plates, crossing the plate from one boundary to the other, then following the large degrees of deformation (18% and more) ring contours encompassing some regions in the volume of plates are formed in the material.

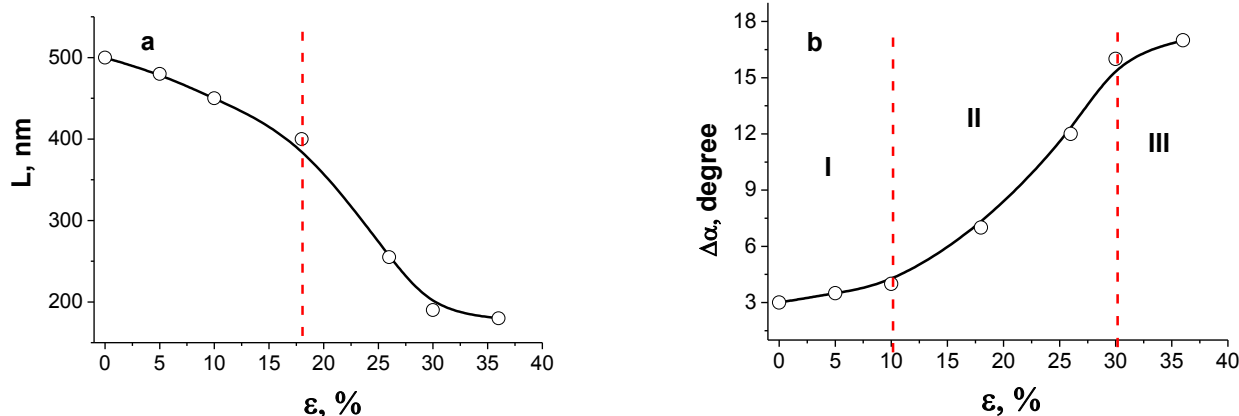


Fig. 9. Dependence of middle longitudinal dimensions of the fragments (a) and the value of an azimuthal component of a complete angle of substructure disorientation (b) on deformation degree

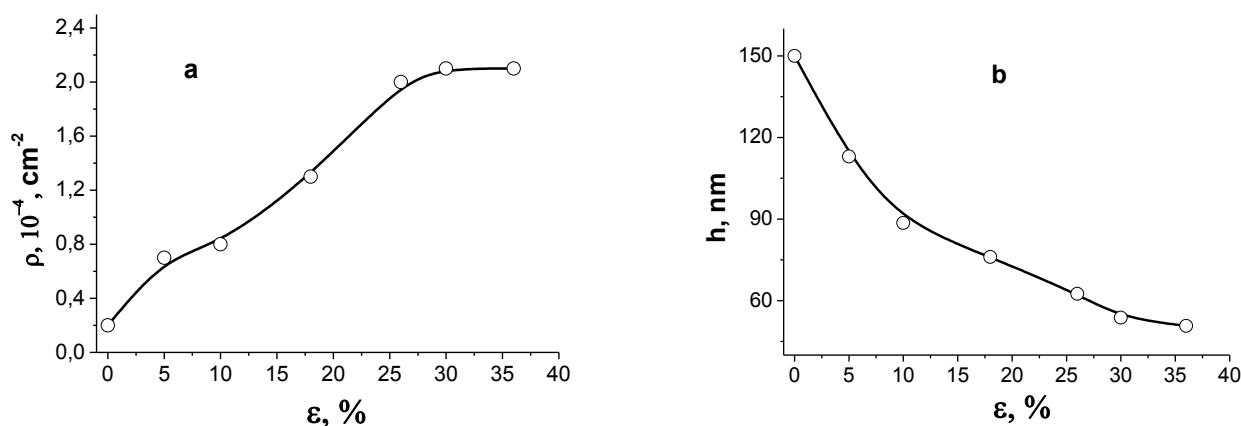


Fig. 10. Dependence of surface contour density (a) and the middle transverse dimensions (b) on deformation degree

The regulations of parameter evolution of structure-phase states and defective substructure of steel under deformation detected above make it possible to analyze the mechanisms of work hardening.

Hardening of the material with low angular boundaries (substructural hardening, hardening with boundaries of plates and fragments) can be estimated using the expression [25]:

$$\sigma(L) = \sigma_0 + k^* L^{-m}, \quad (1)$$

where $m = 1$ or $1/2$, L – effective size of ferrite plates and fragments being defined with effective length of slip plane in the plate. It is established that at $m = 1$ k varies from 0.015 to 0.01 kg/mm^{3/2}; at $m = 1/2$ k varies from 0.2 to 0.98 kg/mm^{3/2} [25, 26].

Dependence of value of contribution from boundaries of fragments to work hardening of steel with bainite structure on degree of deformation is shown in Fig. 11, a. In calculations the following values of parameters included in the equation (1) were used: L – average longitudinal sizes of fragments; $k = 0,015$; $m = 1$. It is clearly seen that with increase in degree of deformation of steel the value of hardening by fragment boundaries increases within 330 to 790 MPa (Fig. 11, a), and it is caused by decrease in average sizes of fragments (Fig. 9, a).

The first term in the equation (1) σ_0 is friction stress of material's lattice that is stress necessary for motion of dislocations in pure monocrystals (for example, Peierls stress for pure metals). Consequently, stress σ_0 depends substantially on degree of material's purity and value of its work hardening. For theoretically pure material $\sigma_0 = 17$ MPa. The experimentally determined values σ_0 vary within 27 to 60 MPa [27, 28]. For steels value $\sigma_0 = 30$ –40 MPa [29].

As noted above, a dislocation substructure of net-like type with a relatively high scalar density of dislocations measuring $\approx 7 \times 10^{10}$ cm⁻² is revealed in ferrite plates having been formed as a result of shear (martensite) mechanism of transformation. Plastic

deformation of steel is accompanied by growth of scalar density of dislocations (Fig. 7, a). In this case the type of dislocation substructure is unchangeable.

Stress needed for supporting a plastic deformation i.e. flow stress σ is connected with density of dislocations in the following manner [27, 30, 31]:

$$\sigma = \sigma_0 + k\sqrt{\rho}, \quad (2)$$

where σ_0 – flow stress of non-dislocation origin (i.e. caused by other mechanisms of hardening); ρ – average (scalar) density of dislocations; $k = m\alpha Gb$; m – Schmidt orientation factor; α – parameter characterizing the value of interdislocation interaction being equal 0.1...0.51 [28, 32]; G – shear modules (≈ 80 GPa); b – Burgers vector of dislocation (0.25 nm). For steels with regard to orientation factor m , $m\alpha \approx 0.5$ is usually taken.

In Fig. 11, b the dependence of value of contribution, being determined by scalar density of dislocations, to the work hardening of steel under study on degree of deformation is shown. It is clearly seen that with the increase in degree of deformation of steel the value of the given contribution is increased proportionally to the growth of scalar density of dislocations varying within the limits of 280 MPa to 360 MPa.

The long-range fields of internal stresses play an important part in formation of yield point, work hardening and failure of crystalline materials. The application of method of electron diffraction microscopy enables one to analyze the value of internal stresses according to of material's structure by several methods: 1) according to radius of segment bending of free dislocations [33, 34]; 2) according to distance between dislocations and parameters of dislocation aggregates [35]; 3) according to distance between active slip planes [36]; 4) according to parameters of bend extinction contours [24]. The fourth method was used in studying the long-range internal fields of stresses in this research.

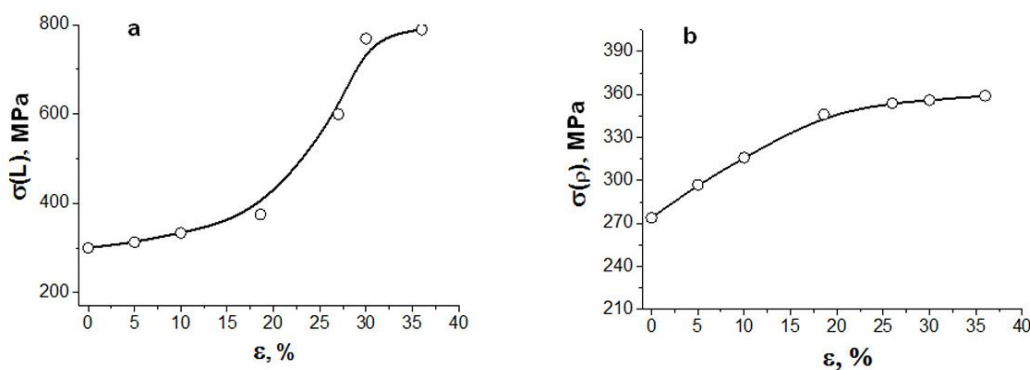


Fig. 11. Dependence of contribution into the flow stress from the boundaries of fragments (a) and dislocation «forest» (b) on deformation degree

The procedure of estimation of value of internal stress fields consists in determining the curvature-torsion gradient of crystal lattice χ [37]:

$$\chi = \frac{\partial \varphi}{\partial \ell} = \frac{0,017}{h}, \quad (3)$$

where h – transverse sizes of bend extinction contour.

Further, value of excessive density of dislocations $\rho_{\pm} = \rho_+ + \rho_-$ (ρ_+ and ρ_- – density of positively and negatively charged dislocations correspondingly) is estimated [21, 37]:

$$\rho_{\pm} = \frac{1}{b} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial \ell}. \quad (4)$$

Value of long-range fields of internal stresses is estimated on the basis of the relation [19]:

$$\begin{aligned} \sigma(h) &= \alpha_c G b \sqrt{\rho_{\pm}} = \alpha_c G b \sqrt{\frac{1}{b} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial \ell}} = \\ &= \alpha_c G \sqrt{\frac{0,017 \cdot b}{h}}, \end{aligned} \quad (5)$$

where $\alpha_c = 1$ – Strunin coefficient [38], h – average transverse sizes of bend extinction contour.

Investigations carried out in this research showed that average transverse sizes of contours decreased with the growth of degree of deformation of steel (Fig. 10, b). Following the expression (5) value of long-range fields of internal stresses will increase (Fig. 12, a).

Bainite steel is characterized by the presence of cementite particles in the structure. The particles are obstacles to motion of dislocations and lead to hardening of the material. Owing to it yield point of the material σ_y increases by value $\Delta \sigma_p$

$$\sigma_y = \sigma_0 + \Delta \sigma_p \quad (6)$$

Estimates of steel hardening under deformation taking into account the presence of cementite particles should be carried out using relations obtained for in-coherent precipitations [39]:

$$\sigma_{op} = M \frac{m G_m b}{2\pi(\lambda - D)} \Phi \cdot \ln \left(\left| \frac{\lambda - D}{4b} \right| \right), \quad (7)$$

where λ – average distance between particles, D – average size of particles, m – orientation factor being equal to 2.75 [40] for bcc lattice of materials, $\Phi = 1$ for screw and $\Phi = (1-\nu)^{-1}$ for edge dislocations, M – parameter considering the nonuniformity of distribution of particles in matrix being equal to 0.81...0.85 [39].

In Fig. 12, b the relation of value of contribution to flow stress of cementite particles on degree of steel deformation with bainite structure is illustrated. It is clearly seen that the value of the contribution varies in a complex way within ranges 210 to 260 MPa. It can be caused by process of dissolution and repeat precipitation of cementite particles under deformation of steel.

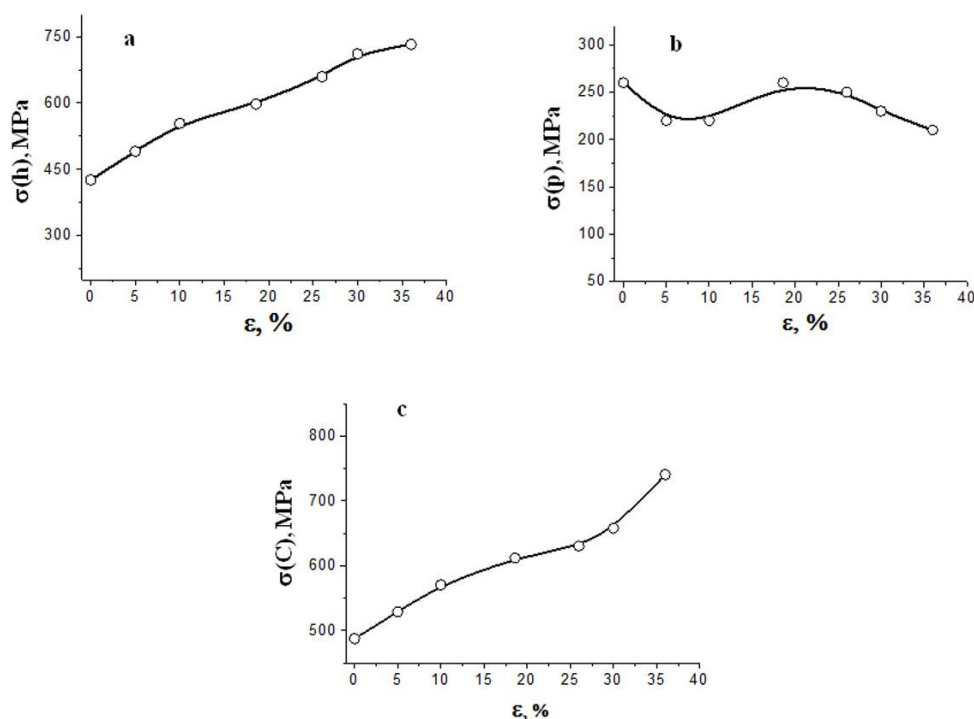


Fig. 12. Dependence of contribution into the flow stress from long-range fields of internal stresses $\sigma(h)$ (a), cementite particles (b) and solid-solution hardening $\sigma(C)$ (c) on deformation degree

Presence of carbon atoms in steel and their penetration into crystal lattice leads to its asymmetric distortion assisting the appreciable hardening of the material.

Hardening of steel in the formation of solid interstitial solutions is usually determined by the main factors: first, disagreement of sizes of atoms of impurity and matrix, second, disagreement of elastic modulus of impurity atoms and matrix. According to Fleischer and Hibbard [41, 42] hardening caused by dimensional and elastic disagreement can be calculated from the relation:

$$\sigma_r = G \cdot \delta_s^{3/2} \cdot \frac{c^n}{m}, \quad (8)$$

where $m = 760$, $\delta_s = |\delta_G| + \alpha_0 |\delta_a|$ – parameter of disagreement, $\alpha_0 = 3$ for edge and $\alpha_0 = 16$ for screw dislocations, $n = 1/2$. In researches [41, 42] it is shown that exponent n can be equal to 1, 1/2, 1/3, 0.3.

The equation (8) is inconvenient for calculating the hardening of solid solution of complex-alloy steels therefore when proposing the additivity of contributions to hardening of separate alloying elements the approximate empirical formula of the following type [10, 29] are used:

$$\sigma_r = \sum_{i=1}^m (k_i \cdot c_i), \quad (9)$$

where k_i – coefficient of hardening of ferrite being the increment of yield point at dissolution of 1 weight % of i element in it, c_i – concentration of i element dissolved in ferrite, weight %. Values of k_i coefficient for different elements are determined experimentally [10, 43, 44].

The decrease in sizes of cementite particles at great degrees of deformation may be indicative of their dissolution and escape of carbon atoms to defects of steel crystal lattice (dislocations, subboundaries and boundaries) and into solid solution based on α -phase.

Carbon enrichment of α -phase of crystal lattice facilitates steel hardening whose value was estimated by the expression (9). The results presented in Fig. 12, c testify that with the increase in degree of steel deformation the value of the given contribution increases varying within 490 to 740 MPa, caused by dissolution of cementite particles, penetration of a part of carbon atoms into iron crystal lattice and precipitation on dislocations.

Comparison of values of contribution to work hardening of hardened steel is shown in Fig. 13. It is clearly seen that the greatest contribution to steel

hardening is made by solid solution hardening (curve 2), internal stress fields (curve 3) and substructural hardening (hardening with intraphase boundaries) (curve 1) at the final stage of deforming. A comparatively small hardening is shown by dislocation substructure (curve 4) and particles of carbide phase (curve 5).

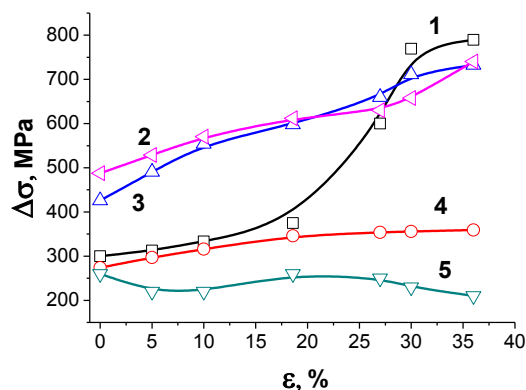


Fig. 13. Dependence of the contribution into the flow stress from intraphase boundaries (1), solid-solution hardening (2), internal stress fields (3), dislocation substructure (4) and cementite particles (5) on deformation degree of steel with a bainite structure

Hence, value of steel work hardening is determined by the availability of a number of mechanisms: friction of matrix lattice, presence of dislocation substructure, particles of carbide phases, intraphase boundaries, carbon atoms and alloying elements dissolved in crystal lattice. It is supposed that total yield point of steel may be represented in terms of linear sum of contribution of separate mechanisms of hardening [10, 44–46]:

$$\sigma = \Delta\sigma_0 + \Delta\sigma(L) + \Delta\sigma(\rho) + \Delta\sigma(h) + \Delta\sigma(p) + \Delta\sigma(C), \quad (10)$$

where $\Delta\sigma_0$ – contribution caused by friction of matrix lattice, $\Delta\sigma(L)$ – contribution caused by intraphase boundaries, $\Delta\sigma(\rho)$ – contribution caused by dislocation substructure, $\Delta\sigma(h)$ – contribution caused by long-range fields of stress, $\Delta\sigma(p)$ – contribution caused by the presence of particles of carbide phases, $\Delta\sigma(C)$ – contribution caused by atoms of alloying elements. As seen from the equation (10), principle of additivity suggests the independent action of each of the mechanism of hardening on yield point of the material.

The curves of deformation hardening of steel with bainite structure calculated by the results of estimates of hardening mechanisms (curve 1) and

revealed in the experiment (curve 2) are shown in **Fig. 14**. It is clearly seen that relation σ - ε obtained in analysis of mechanisms of steel hardening (curve 1) at degrees of deformation increasing $\approx 15\%$ exceeds the values revealed in experiment (curve 2). With the growth of degree of deformation the disagreement of experimentally obtained and theoretically calculated curves of work hardening increases.

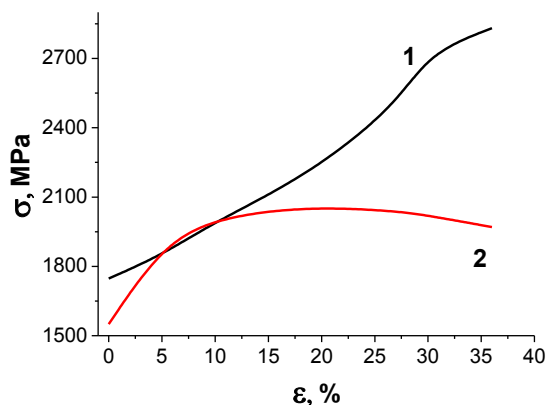


Fig. 14. Curves of steel strain hardening, calculated on the estimation results of the hardening mechanisms (curve 1) and the revealed one during the experiment (curve 2)

Electron microscopy investigations of steel with bainite structure carried out in the research revealed the presence of process of deformation microtwinning. A characteristic image of structure of deformed steel with microtwins is shown in **Fig. 8**. At degrees of deformation $\varepsilon = 5\%$ and 10% the deformation twinning of steel is weakly expressed (**Fig. 7, b**). At greater values of ε the volume fraction of the material covered by deformation microtwinning increases substantially. Hence, on the basis of the results obtained in researches [47, 48] the assumption can be made that the revealed discrepancies of the experimentally obtained and theoretically calculated curves of steel work hardening, that are the most considerable at great degrees of deformation, are caused by the inclusion of microtwinning into the process of steel deformation.

By the present time the fundamental statement has been established that plastic deformation always develops nonuniformly and susceptible to localization not only at microscopic (dislocation) level but at meso- and macrolevels as well [49].

At degrees of deformation 36% and greater the formation of regions of deformation localization placed along interfaces of adjacent plates of bainite or grain boundaries is observed. Their structure is similar to structure of channels observed under drawing deformation of steel 08Mn2Si and com-

pression deformation of hardened steel 38Cr3Ni3MoV [19, 50–52] (**Fig. 15, a**).

Regions of deformation localization in dark field images in matrix reflexes have a tabby contrast. Microelectron diffraction patterns obtained from these regions as a rule have a quasi-ring structure (**Fig. 15, b**) indicating to the small (50 – 100 nm) size of crystallites forming them and predominantly wide angular disorientation of crystallites. Channel of deformation has a layer structure resembling the structure of martensite packet. Regions of deformation localization extend to tens of microns in length and reach 0.5 μm in diameter. With growth of degree of deformation the average sizes of deformation channels increase.

Judging from the structure of microelectron diffraction pattern shown in **Fig. 15, b** the particles of the second phase are present in the volume of deformation channel. Reflexes from the particle of the second phase are highly distorted both in radial and azimuthal directions. This circumstance can be caused by both distortion of crystal lattice of particles and their small sizes [20, 21]. Microelectron diffraction pattern obtained from regions of foil adjacent to the channel are point ones being characteristic of polycrystalline material. With the growth of degree of deformation the volume of material occupied by channels of deformation increases reaching several percents at the moment of steel failure.

In deformation channel the substructure is also fragmented one, however sizes of fragments are far less than in the main volume of the material. In addition, fragments in deformation channel are isotropic in shape. Judged from the size of fragments it should be believed that a shear exceeding several-fold the average one is localized in deformation channel.

The next feature of deformation channel structure is connected with the behavior of extinction contours in them. It should be noted that bend extinction contours mark the regions with the same orientation of concrete planes of reflection relative to falling beam of electrons [20, 21]. It is established that both in deformation channel and in regions adjacent to it the portions of same orientation or close to it and extended approximately parallel to the long side of channel are present. In the context of hydrodynamics the portions such as these are analogous to lines of flow in laminar flow [19, 50–52]. Since under compression a considerable number of portions with turbulent flow come into being as a rule a comparison such as this may throw light on nature of deformation channels. Namely, the conditions of deformation in them are such that work of deformation appears to be lower than in adjacent portions. It may be suggested that local heating of the material plays the main part here [19, 50–52].

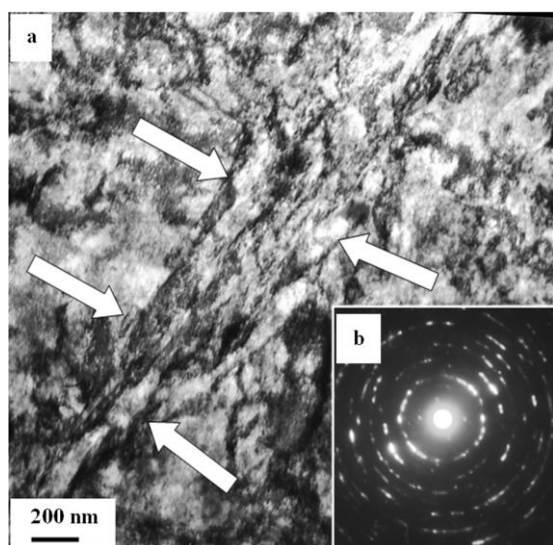


Fig. 15. Channels of deformation being formed in steel 30Cr2Ni2MoV with bainite structure, $\varepsilon=43\%$; a – light field; b – microelectron diffraction pattern.

The channel of deformation is designated with arrows in (a)

One more feature of deformation channels is considerable fields of stress localized inside them and in regions adjacent to them. In [19, 50–52] two mechanisms of relaxation of these stress fields are noted. First, it is done by fragmentation. In this case the chains of fragments of small sizes and close orientation located along the deformation channel are formed. Second, it is done by extension of microcracks. A comparative analysis of structure of deformation channels of bainite steel 30Cr2Ni2MoV and steels 08Mn2Si and 38Cr3Ni3MoV [19, 50–52] is indicative of unified nature of their formation.

4. Conclusion

The investigations of structure, phase composition and defective substructure of steel with bainite structure subjected to plastic deformation were carried out. The quantitative analysis of parameters of steel structure that made it possible to follow the redistribution of carbon atoms in steel structure under plastic deformation was performed. It was established that with growth of degree of deformation the quantity of carbon atoms located in solid solution based on α -iron and defects of crystal lattice as well as cementite particles lying on intraphase boundaries increased; the quantity of carbon atoms forming cementite particles lying in volume of bainite plates and those located in solid solution based on γ -iron decreased.

It was shown that carbide transformations in bainite structure ran in frames of two competitive processes –

dissolution of cementite particles having been formed in the process of bainite transformation in volume of ferrite plates, and precipitation of cementite particles on the elements of dislocation substructure in the process of “deformation ageing”. Simultaneously with it the additional transformation of retained austenite initiated by steel deforming was observed.

It was shown that plastic deformation by uniaxial compression of steel 30Cr2Ni2MoV with bainite structure is accompanied by: first, increase in scalar density of dislocations and volume of material containing deformation microtwins, second, decrease in average transverse sizes of fragments and increase in degree of their disorientation, third, increase in quantity of stress concentrators and curvature-torsion amplitude of crystal lattice of the material. The stages of changes of steel structure parameters were revealed. The proposal was made about the changing in steel deformation mechanism: at the first stage of loading ($0\% < \varepsilon < 18\%$) deformation was done predominantly by motion of dislocations; at the second stage ($18\% < \varepsilon < 36\%$) – it was done by motion of dislocations and twinning.

It was shown that steel hardening had a multifactor character. The estimates of mechanisms of hardening by boundaries of bainite plates and fragments, scalar density of dislocations, long-range stress fields, cementite particles, and interstitial atoms were carried out. The largest contribution to the value of work hardening of steel under study was made by substructural hardening (hardening caused by long-range internal fields of stresses and fragmentation of structure) and solid solution hardening caused by penetration of carbon atoms into crystal lattice of ferrite.

At degree of deformation $\varepsilon > 36\%$ the formation of channels of localized deformation – particular structural states of material being localized along the interfaces of adjacent plates of bainite or grain boundaries was revealed.

The research was done supported by the grant of the Russian Scientific Fund (project №15-12-00010).

References

1. Ohmori Y., Jung Y.-C., Nakai K., Shiori H. Bainite transformation and the diffusional migration of bainite/austenite broad interfaces in Fe-9%Ni-C alloys // *Acta Materialia*. 2001. Vol. 49. Iss. 6. P. 3149–3162.
2. Quidort D., Brechet Y.J.M. Isothermal growth kinetics of bainite in 0.5% C steels // *Acta Materialia*. 2001. Vol. 49. Iss. 20. P. 4161–4170.
3. Sourmail T., Smanio V. Low temperature kinetics of bainite formation in high carbon steels // *Acta Materialia*. 2013. Vol. 61. Iss. 7. P. 2639–2648.
4. Clarke A.J., Speer J.G., Miller M.K. et al. Carbon partitioning to austenite from martensite or bainite during the quench and partition process: A critical assessment // *Acta Materialia*. 2008. Vol. 56. Iss. 1. P. 16–22.

5. Borgenstam A., Hillert M., Agren J. Metallographic evidence of carbon diffusion in the growth of bainite // *Acta Materialia*. 2009. Vol. 57. Iss. 11. P. 3242–3252.
6. Gudremont E. Special steels. Moscow: Metallurgiya, 1966. 1274 p.
7. Matrosov Yu.I., Litvinenko D.A. and Golovanenko S.A. Steel for gas pipelines. Moscow: Metallurgiya, 1989. 288 p.
8. Pavlov V.V., Godik L.A., Korneva L.V., Kozyrev N.A., Kuznetsov E.P. Railway rails from bainite steel // *Metallurg*. 2007. Iss. 4. P. 51–53.
9. Novikov I.I. Theory of thermal treatment of metals. Moscow: Metallurgiya, 1978. 392 p.
10. Pikerling F.B. Physical metallurgy and development of steels. Moscow: Metallurgiya, 1982. 184 p.
11. Kurdjumov V.G., Utevskii L.M. and Entin R.I. Transformations in iron and steel. Moscow: Nauka, 1977. 236 p.
12. Bhadeshia H.K.D.H. Bainite in Steels. 2nd ed. The Institute of Materials London, 2001. 460 p.
13. Lee S.-J., Park J.-S., Lee Y.-K. Effect of austenite grain size on the transformation kinetics of upper and lower bainite in a low-alloy steel // *Scripta Materialia*. 2008. Vol. 59. Iss. 1. P. 87–90.
14. Sourmal T., Smanio V. Low temperature kinetics of bainite formation in high carbon steels // *Acta Materialia*. 2013. Vol. 61. Iss. 7. P. 2639–2648.
15. Fucheng X. and Luyut Ch. Bainite steels with ultra-low content of carbon and prospects of their application // *Problems of Materials Science*. 2008. Vol. 53. Iss. 1. P. 52–61.
16. Fang H.-S., Yang J.-B., Yang Z.-G., Bai B.-Z. The mechanism of bainite transformation in steel // *Scripta Materialia*. 2012. Vol. 47. Iss. 3. P. 157–162.
17. Speich G. and Swann P.R. Regularities of steel work hardening // *J. Iron and Steel Inst.* 1965. Vol. 203. Iss. 4. P. 480–485.
18. Belous M.V., Cherepin V.T. and Vasiliev M.A. Transformations on tempering of steel. Moscow: Metallurgiya, 1973. 290 p.
19. Ivanov Yu.F., Kornet E.V., Kozlov Ye.V. and Gromov V.E. Hardened structural steel: structure and mechanisms of hardening. Novokuznetsk: Izd-vo SibGIU, 2010. 174 p.
20. Utevskii L.M. Diffraction electron microscopy in physical metallurgy. Moscow: Metallurgiya, 1973. 584 p.
21. Hirsh P., Khovi A., Nikolson R., Pjeshli D. and Uelan M. Electron microscopy of thin crystals. Moscow: Mir, 1968. 574 p.
22. Pridantsev M. V., Davydova L. N. and Tamarina A. M. Structural Steel Handbook. Moscow: Metallurgiya, 1980. 288 p.
23. Koneva N.A. and Kozlov Ye.V. Nature of substructural hardening // *Russian Physics journal*. 1982. Iss. 8. P. 3–14.
24. Koneva N.A., Kozlov Ye.V., Trishkina L.I. and Lychagin D.V. The long-range stress fields, curvature-torsion of the crystal lattice and the stage of plastic deformation. Measurement methods and results // *Proceedings of the International Conference "New Methods in Physics and Mechanics of Deformed Solid Body"*. Tomsk: TGU, 1990. P. 83–93.
25. Naulor I.R. The influence of the lath morphology on the yield strength and transition temperature on martensite-bainite steel // *Met. Trans.* 1979. Vol. 10A. Iss. 7. P. 873–891.
26. Belen'kiy B.Z., Farber B.M. and Goldshtein M.I. Hardness estimates of low-carbon low-alloy steels according to structural data // *The Physics of Metals and Metallography*. 1975. Vol. 39. Iss. 3. P. 403–409.
27. Trefilov V.I., Moiseev V.I., Pechkovskiy Ye.P. et al. Deformation hardening and failure of polycrystalline metals. Kiev: Naukova dumka, 1987. 248 p.
28. Mac Leen D. Mechanical properties of metals. Moscow: Metallurgiya, 1965. 431 p.
29. Goldshteyn M.I. and Farber B.M. Dispersion hardening of steel. Moscow: Metallurgiya, 1979. 208 p.
30. Shtremel M.A. Strength of alloys. Part II: Deformation. Moscow: MISIS, 1997. 527 p.
31. Predvoditelev A.A. The present state of the art of dislocation ensembles study // *Problems of Modern Crystallography*. Moscow: Nauka, 1975. P. 262–275.
32. Embry I.D. Strengthening by dislocations structure // *Strengthening Method in Crystals*. Applied Science Publishes. 1971. P. 331–402.
33. Static strength and mechanics of failure of steels: Collected articles, translated from German / Edited by V. Dal', V. Anton. Moscow: Metallurgiya, 1986. 566 p.
34. Hall E.O. The deformation and ageing of mild steel: III discussion of results // *Proc. Phys. Soc.* 1951. Vol. 64B. P. 747–753.
35. Lukke K. and Gottshtein G. Atomic mechanisms of plasticity of metals // *Static strength and mechanics of failure of steels: Collected articles, translated from German / Edited by V. Dal', V. Anton*. Moscow: Metallurgiya, 1986. P. 14–36.
36. Dal' V. Increase in strength at the expense of grain refinement // *Static strength and mechanics of failure of steels: Collected articles, translated from German / Edited by V. Dal', V. Anton*. Moscow: Metallurgiya, 1986. P. 133–146.
37. Gromov V.E., Kozlov Ye.V., Bazaikin V.I., Cellermaer V.Ya. and Ivanov Yu.F. Physics and mechanics of drawing and forging. Moscow: Nedra, 1997. 293 p.
38. Strunin B.N. On distribution of internal stresses at random arrangement of dislocations // *Solid State Physics*. 1967. Vol. 9. Iss. 3. P. 805–812.
39. Ashby M.F. *Physics of Strength and Plasticity*. MIT press Cambridge. Mass. 1969. P. 113.
40. Tekin E., Kelly P.M. Tempering of steel precipitation from iron base alloys. Gordon: Breach, 1965. 283 p.
41. Barnard S.J., Smith G.D.W., Saricaya M., Thomas G. Carbon atom distribution in a dual phase steels: on atom probe study // *Scripta met.* 1981. Vol. 15. Iss. 4. P. 387–392.
42. Fleischer R.L. Dislocation structure in solution hardened alloys // *Electron microscopy and strength of crystals*. New York; Wiley: Interscience, 1963. P. 973–989.
43. Vohringer O., Macherauch E. Structure und Mechanische eigenschaft von martensite // *H.T.M.* 1977. Vol. 32. Iss. 4. P. 153–202.
44. Ridley N., Stuart H. and Zwell L. Lattice parameters of Fe-C austenite of room temperature // *Trans. Met. Soc. AIME*. 1969. Vol. 246. Iss. 8. P. 1834–1836.
45. Norstrom L.A. On the yield strength of quenched low-alloy lath martensite // *Scandinavian J. of Met.* 1976. Vol. 5. Iss. 4. P. 159–165.
46. Prnka T. Quantitative relationships between parameters of dispersion precipitations and mechanical properties of steels // *Physical metallurgy and heat treatment of steel*. 1979. Iss. 7. P. 3–8.
47. Koneva N.A., Kiseleva S.F., Popova N.A. and Kozlov Ye.V. Evolution of internal stresses and density of stored energy under deformation austenite steel 110Mg13 // *Deformation and failure of materials*. 2013. Iss. 9. P. 38–42.
48. Kiseleva S.F., Popova N.A., Koneva N.A. and Kozlov Ye.V. Effect of transformation twins on excessive density of dislocations and internal stresses of deformed fcc crystal lattice of material // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics*. 2012. Vol. 76. Iss. 13. P. 70–74.
49. Likhachev V.A., Panin V.E., Zashimchuk E.E. et al. Cooperative deformation process and localization of deformation. Kiev: Naukova dumka, 1989. 320 p.
50. Gromov V.E., Panin V.E., Kozlov Ye. V. et al. Channels of deformation in conditions of electrostimulated drawing // *Metallphysics*. 1991. Vol. 13. Iss. 11. P. 27–34.
51. Gromov V.E., Petrunin V.A. Localization of plastic deformation under conditions of electrostimulated drawing // *Physica status Solidi (a)*. 1993. Vol. 139. P. 77–81.
52. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Kozlov Ye. V., Sosnin O.V. Evolution of channels of localized deformation in the process of electrostimulated drawing of low carbon steel // *Izvestiya Vuzov. Ferrous metallurgy*. 1997. Iss. 6. P. 42–45.

Материал поступил в редакцию 26.01.16.

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-1-87-100

БЕЙНИТНАЯ СТАЛЬ: СТРУКТУРА И ДЕФОРМАЦИОННОЕ УПРОЧНЕНИЕГромов В.Е.¹, Никитина Е.Н.¹, Иванов Ю.Ф.^{2,3}, Аксенова К.В.¹, Семина О.А.¹¹ Сибирский Государственный Индустриальный Университет, Новокузнецк, Россия² Институт Сильноточной Электроники Со РАН, Томск, Россия³ НИУ Томский Политехнический Университет, Томск, Россия

Аннотация. С использованием методов просвечивающей электронной микроскопии проведен анализ количественной оценки дефектной и карбидной подсистем среднеуглеродистой стали с бейнитной структурой при деформации сжатием до 36%. Проведен количественный анализ перераспределения углерода, а также установлена зависимость концентрации атомов углерода в кристаллической решетке α - и γ -железа, в структурных дефектах, в частицах цементита, расположенных в объеме бейнитных пластин и на межфазных границах, от степени деформации.

Показано, что по мере увеличения степени деформации скалярная плотность дислокаций, объем материала с деформационными двойниками, количество концентраторов напряжений, амплитуда кривизны кручения кристаллической решетки, степень разориентировки фрагментов увеличиваются, а средние продольные размеры фрагментов уменьшаются. Выполнена оценка дальнедействующих полей напряжений. Обсуждены возможные причины стадийности изменения

параметров карбидной фазы и дислокационной субструктуры при деформации.

Проведена оценка механизмов упрочнения с учетом границ пластин и фрагментов, скалярной плотности дислокаций, дальнедействующих полей напряжений, цементитных частиц, атомов внедрения. Показано, что наибольший вклад в деформационное упрочнение исследуемой стали вносит субструктурное упрочнение (упрочнение, обусловленное внутренними дальнедействующими полями напряжений и фрагментацией структуры) и твердорастворное упрочнение вследствие внедрения атомов углерода в кристаллическую решетку феррита.

Сделано предположение, что причиной разупрочнения стали с бейнитной структурой при высокой степени деформации (более 15%) является развитие деформационного микродвойникования.

Ключевые слова: упрочнение, бейнит, деформация, цементит, дислокационная субструктура, механизмы упрочнения, сталь.

Bainite steel: structure and work hardening / Gromov V.E., Nikitina E.N., IvanovYu.F., Aksenova K.V., Semina O.A. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14. №1. С. 87–100. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-1-87-100

Gromov V.E., Nikitina E.N., IvanovYu.F., Aksenova K.V., Semina O.A. Bainite steel: structure and work hardening. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 1, pp. 87–100. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-1-87-100

СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

УДК 658.6

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-1-101-108

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ И ПРИНЦИПОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ АДАПТАЦИИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА В ПРОЦЕССАХ ПРОИЗВОДСТВА МЕТИЗНОЙ ПРОДУКЦИИ

Голубчик Э.М.¹, Кузнецова А.С.¹, Рубин Г.Ш.¹, Гун Г.С.¹, Дья Х.²¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия² Ченстоховский Технологический Университет, Польша

Аннотация. В настоящее время наблюдается тенденция ужесточения требований потребителей к металлопродукции. В связи с этим для повышения своих конкурентных преимуществ металлопроизводители должны быть способны оперативно адаптироваться к изменяющимся условиям, что особенно актуально для рынка метизной продукции. При этом получают свое дальнейшее развитие технологии, основанные на применении новых материалов повышенной и высокой прочности, в частности сталей с ультрамелкозернистой структурой. Внедрение данных материалов в метизной отрасли предполагает применение новых современных методов и подходов к исследованию технологических процессов. Учеными ФГБОУ ВПО «МГТУ» разработана методология адаптивного управления качеством металлопродукции широкого спектра назначения, предусматривающая возможность построения технологического процесса с гарантированным обеспечением нормируемого уровня качества в условиях неполноты априорной информации. Целью работы являлись разработка и исследование технологии производства крепежных изделий повышенного класса прочности с применением сталей марок 20 и 45 с УМЗ структурой в условиях действующего предприятия ОАО «ММК-МЕТИЗ». В работе представлены результаты комплексных исследований применимости новой методологии на примере разработки технологии холодной объемной штамповки болтов М10 и М16.

Ключевые слова: адаптивное управление качеством, прогнозирование, крепеж, прочность, УМЗ структура.

Постановка проблемы

Своевременная адаптация предприятия к рыночным условиям является одним из прогрессивных, высокоэффективных приемов управления производственными процессами, способствующих повышению качества технологических процессов, доходности предприятий, экономического роста и, как следствие, достижению высокой конкурентоспособности выпускаемой продукции как на российском, так и на мировом рынке.

На предприятиях металлургической отрасли обеспечить оперативную адаптацию к современным условиям быстро меняющегося рынка металлопродукции возможно, в первую очередь, благодаря всестороннему внедрению новых материалов, передовых технологий их переработки, технико-технологического об-

новления производства, а также применению инновационных разработок в области управления качеством. Особенно это актуально для метизной промышленности, в которой на большинстве российских предприятий отрасли наблюдается преобладание физически и морально устаревших технологий и оборудования. При этом на рынке метизной продукции существенно возросли требования к повышению механических и, в первую очередь, прочностных свойств изделий.

В металлургической практике все активнее расширяется применение нового класса сталей, таких как стали с ультрамелкозернистой структурой (УМЗ структурой), позволяющих в значительной степени обеспечить растущие требования потребителей по качеству и уровню механических свойств, составляя конкуренцию дорогостоящим легированным сталям [1–20]. В

то же время производство металлоизделий, в том числе машиностроительного крепежа из сталей с УМЗ структурой, ограничено, во-первых, из-за отсутствия разработанных принципов и подходов к управлению показателями качества изделий из подобных материалов на различных технологических стадиях производства и, во-вторых, в связи с несовершенством существующих методик исследования физико-механических свойств крепежа, требующих их оперативной технологической адаптации применительно к сталям с УМЗ структурой.

В таких условиях достаточно эффективными могут являться принципы адаптивного управления качеством в совокупности с применением современных инженерных программных комплексов моделирования процессов ОМД, таких, например, как DEFORM-3D® [21].

В связи с вышеизложенным, целью настоящей работы являлось проведение комплекса исследований, связанных с анализом возможностей производства крепежа повышенного класса прочности из сталей с УМЗ структурой в условиях действующего метизного предприятия на основе разработки модели и принципов технологической адаптации показателей качества метизов в процессах холодной объемной штамповки (ХОШ).

Теория, материалы и методы исследования, технические и технологические разработки

В настоящее время в мировой производственной практике активно развиваются концепции, основанные на принципах адаптивного управления качеством [22–28]. Несмотря на достаточное многообразие известных подходов адаптивного управления, все они строятся на основе оценки результатов деятельности производственной системы на уже полученных фактических данных, что не позволяет осуществлять оперативное управление качеством на отдельно взятой технологической стадии жизненного цикла продукции. Кроме того, традиционные методики не обеспечивают возможность раннего прогнозирования уровня качественных показателей, который может быть достигнут к финишным стадиям технологической обработки, что не позволяет осуществить выбор наиболее приемлемого решения ведения технологического процесса при изменяющихся внешних воздействиях (например, требованиях потребителей), который бы гарантированно обеспечивал до-

стижение в конечном металлоизделии нормированного уровня качества.

В ФГБОУ ВПО «МГТУ» разработан новый методологический подход по адаптивному управлению качеством в условиях иерархически сложных технологических систем, позволяющий учитывать влияние изменчивости показателей качества при производстве металлопродукции на достигаемый конечный уровень ее свойств в зависимости от внешних воздействий, а также осуществлять раннее прогнозирование формируемого комплекса параметров в условиях действующего металлургического предприятия [29]. Основу данного подхода составляет модель технологической адаптации (рис. 1). Ее сущность заключается в обеспечении возможности управления нормируемыми свойствами выпускаемого металлоизделия Z за счет соответствующего адаптивного управления параметрами обработки изделия/заготовки на данной технологической стадии (параметрическая адаптация) или путем изменения структуры процесса – последовательности и/или набора технологических операций (структурная адаптация). Кроме того, модель предусматривает адаптацию требуемого набора параметров в исходной заготовке (например, для катанки это – размерно-марочный сортамент). При этом устанавливается внутренний по переделам целевой уровень по качеству R, который за счет структурно-параметрической технологической адаптации приближается к внешнему нормируемому целевому уровню Z.

На основе представленной методологии применительно к процессам производства крепежа из сталей с УМЗ структурой были разработаны следующие принципы технологической адаптации:

- принцип «альтернативности» – применение альтернативных типов стали (сталь с УМЗ структурой);
- принцип «экономической оптимальности» – для каждого вида металлоизделия должно быть найдено соответствие между эффективностью применения данного материала и совокупными затратами на реализацию производства изделия из него;
- принцип «гибкости» – способность технологической системы изменять свои составляющие и направленность в соответствии с требованиями потребителей и возможностями производителей.



Рис. 1. Структурная модель технологической адаптации показателей качества металлопродукции

В рамках рассматриваемой концепции адаптивного управления был предложен универсальный алгоритм, позволяющий осуществлять прогнозирование достигаемого конечного уровня значений показателей качества готового металлоизделия на ранних стадиях его производства без проведения затратных испытаний разрушающими методами. В общем случае разработанный алгоритм адаптивного управления показателями качества в процессах ХОШ включает следующие структурные элементы: анализ научной и технической документации; анализ базовой (адаптированной) технологии производства; анализ возможности реализации предлагаемых адаптивных технологических мероприятий и процедур с учетом особенностей используемых материально-технических ресурсов и оборудования; анализ результатов и выдача рекомендаций к внедрению в производство.

Реализация разработанной модели осуществлялась при изготовлении болтов с шестигранной головкой методом высадки, предварительно калиброванных с различной степенью суммарного обжата, на основе технологической схемы производства, действующей в условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ» (г. Магнитогорск).

Результаты исследования и их обсуждение

На основе разработанного подхода для обеспечения возможности производства болтов М10 и М16 из стали марок 20 и 45 с УМЗ структурой на существующем в условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ» оборудовании первоначально было проведено исследование в программном комплексе DEFORM-3D®, включающее моделирование процесса калибрования, ХОШ и последующие аттестационные испытания (рис. 2) [30, 31].

Для проверки адекватности результатов компьютерного моделирования было осуществлено опытное изготовление болтов М10 и М16 из стали с УМЗ структурой по разработанному режимам. В таблице представлены полученные сравнительные результаты механических свойств крепежа.

На рис. 3, 4 представлены микроструктуры болтов М10 и М16 из стали марок 20 и 45 с УМЗ структурой, полученных с применением предварительной обработки заготовки методом РКУП.

Анализ полученных результатов показал, что использование стали с УМЗ структурой позволило достичь повышенного уровня механических свойств по сравнению с традици-

онно получаемыми марками стали. Испытания показали, что болты, изготовленные из стали марки 20, имели класс прочности 6.8 и $\sigma_B = 686 \text{ Н/мм}^2$, а болты из стали марки 45 – класс прочности 8.8 и $\sigma_B = 873 \text{ Н/мм}^2$ (в соответствии с ГОСТ Р 52627-2006). Сравнительный анализ результатов экспериментальных исследований и математического моделирования подтвердил адекватность полученных

данных и возможность использования программной среды DEFORM-3D для прогнозирования свойств метизов.

Результаты проведенных исследований подтвердили технологическую возможность применения сталей марок 20 и 45 с УМЗ структурой для производства крепежа повышенного класса прочности в условиях действующего метизного предприятия.

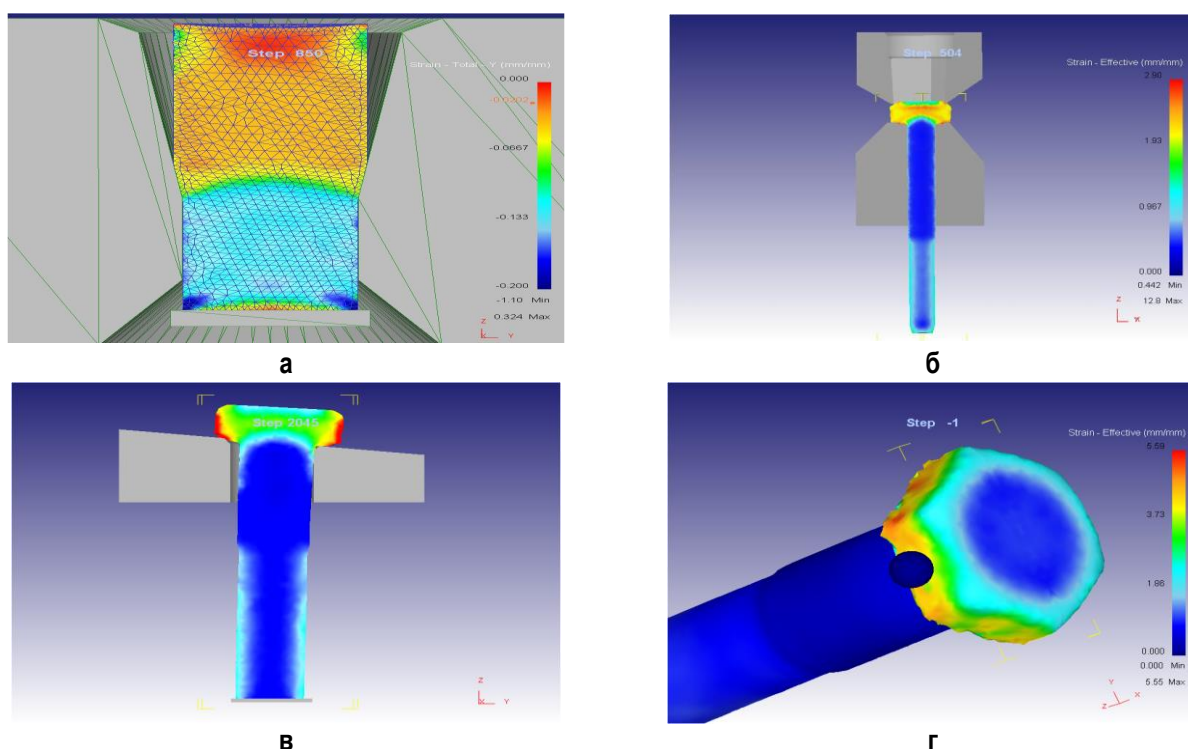


Рис. 2. Моделирование технологических операций ХОШ в программном комплексе DEFORM-3D: а – калибрование; б – холодная объемная штамповка; в – испытание на растяжение на косой шайбе; г – измерение твердости по Бринеллю

Физико-механические свойства машиностроительного крепежа после операции калибрования и испытаний на растяжение на косой шайбе болтов из стали марок 20 и 45 с УМЗ структурой

Вид крепежа	Маршрут калибрования	Суммарная степень обжатия, %	Временное сопротивление разрыву (после калибрования) σ_B , МПа		Временное сопротивление разрыву (после высадки болта), с УМЗ структурой/традиционные, σ_B , МПа		Значение твердости по Бринеллю, НВ	
			Сталь 20	Сталь 45	Сталь 20	Сталь 45	Сталь 20	Сталь 45
Болт М10	9,65	0	791,4	890	811/770	902	257	300
	12-9, 65	35	1019	1159	870	1018	264	307
	14-12-9, 65	52,5	1044	1245	886	1039	250	279
Болт М16	15,5	0	797	890	816/686	924/873	256	299
	17-15,5	18	966,5	1112	869	1014	263	307
	19-17-15,5	34	1025	1310	891	1042	257	300

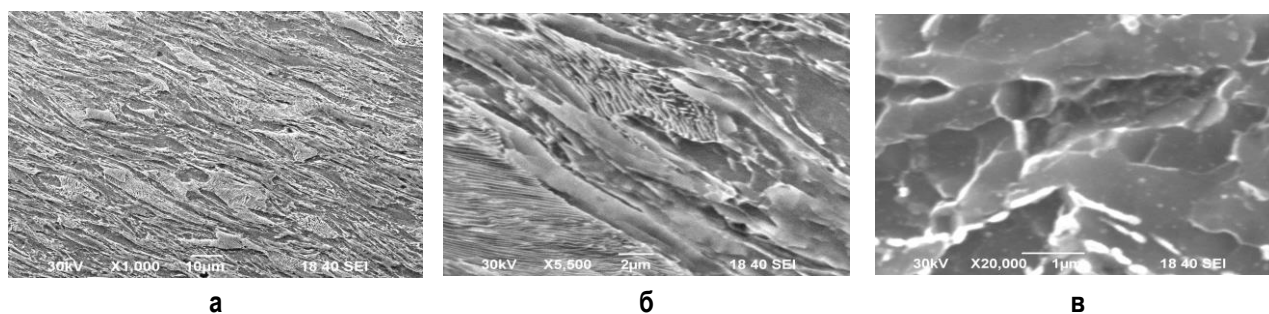


Рис. 2. Особенности микроструктуры в продольном сечении болта диаметром 16 мм из стали марки 20 с УМЗ структурой: а – общий вид; б – деформационные полосы; в – фрагменты в феррите

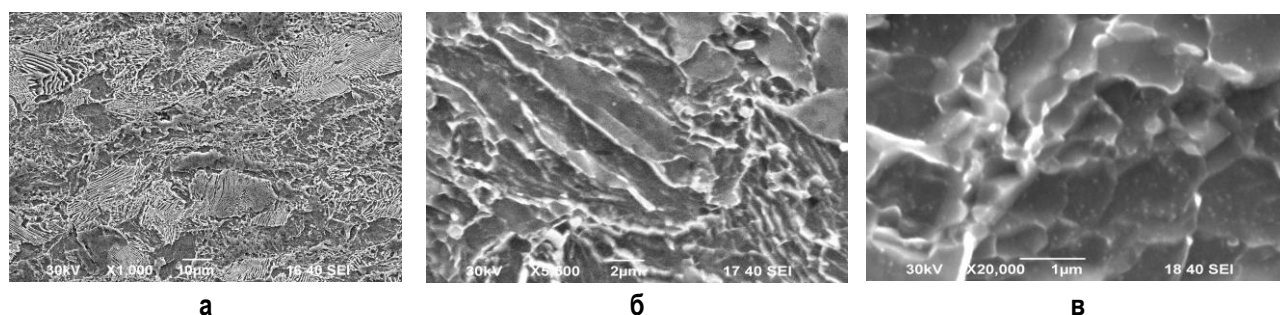


Рис. 3. Особенности микроструктуры в продольном сечении болта диаметром 16 мм из стали марки 45 с УМЗ структурой: а – общий вид; б – деформационные полосы; в – фрагменты в феррите

Заключение

Применение предложенного подхода, основанного на принципах технологической адаптации показателей качества, позволило с высокой эффективностью разработать и реализовать процесс изготовления инновационных видов металлоизделий в условиях предприятия металлургической отрасли, а также определить наиболее рациональные схемы построения технологических воздействий с возможностью обеспечения нормируемого потребителями уровня качества.

Работа проведена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства с участием высшего образовательного учреждения (Договор № 02.G25.31.0178), а также государственного задания Минобрнауки России № 11.1525.2014К от 18 июля 2014 г.

Список литературы

1. Корчунов А.Г., Чукин М.В., Полякова М.А. Принципы проектирования непрерывного способа получения стальной проволоки с ультрамелкозернистой структурой // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. № 1. С. 43–46.
2. Чукин М.В., Полякова М.А., Емалеева Д.Г. Влияние комбинированных методов деформационной обработки на механические свойства углеродистой проволоки // Черные металлы. 2014. № 12. С. 35–39.

3. Чукин М.В., Копцева Н.В., Валиев Р.З. Дифракционный электронно-микроскопический анализ субмикроструктурной и нанокристаллической структуры конструкционных углеродистых сталей после равноканального углового прессования и последующего деформирования // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2008. №1. С. 31–37.
4. Инновационный потенциал новых технологий производства метизных изделий из наноструктурных сталей / Чукин М.В., Копцева Н.В., Барышников М.П., Ефимова Ю.Ю., Носов А.Д., Носков Е.П., Коломиец Б.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2009. № 2. С. 64–68.
5. Ефимова Ю.Ю., Копцева Н.В., Никитенко О.А. Исследование состояния карбидной фазы после наноструктурирования и последующего волочения низкоуглеродистой стали // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2009. № 3. С. 45–48.
6. Копцева Н.В., Михоленко Д.А., Ефимова Ю.Ю. Эволюция микроструктуры и свойств при нагреве ферритно-перлитных углеродистых конструкционных сталей с ультрамелкозернистой структурой, сформированной интенсивной пластической деформацией // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. №9. С. 85–91.
7. Актуальные проблемы квалиметрии метизного производства в период зарождения шестого технологического уклада / Гун Г.С., Чукин М.В., Рубин Г.Ш., Мезин И.Ю., Корчунов А.Г. // Металлург. 2014. № 4. С. 92–95.
8. Перспективы производства высокопрочной стальной арматуры для железобетонных шпал нового поколения на основе термомеханического наноструктурирования / Чукин М.В., Гун Г.С., Корчунов А.Г., Полякова М.А. // Черная металлургия: Бюл. Черметинформации. 2012. Вып. 4. С. 100–105.
9. Исследование физико-механических свойств и структуры высокопрочных многофункциональных сплавов инварного класса нового поколения / Чукин М.В., Голубчик Э.М., Гун Г.С., Копце-

- ва Н.В., Ефимова Ю.Ю., Чукин Д.М., Матушкин А.Н. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 1 (45). С. 43–48.
10. Генезис научных исследований в области качества металлопродукции / Гун Г.С., Мезин И.Ю., Рубин Г.Ш., Минаев А.А., Назайбеков А.Е., Дья Х. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 1 (45). С. 92–97.
11. Научно-педагогическая школа Магнитогорского государственного технического университета по управлению качеством продукции и производственных процессов / Гун Г.С., Мезин И.Ю., Корчунов А.Г., Чукин М.В., Гун И.Г., Рубин Г.Ш. // Качество в обработке материалов. 2014. № 1. С. 5–8.
12. Nanodimensional structural part formation in high carbon steel structural part formation by thermal and deformation processing / Chukin M.V., Korchunov A.G., Gun G.S., Polyakova M.A., Koptseva N.V. // Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University. 2013, no. 5 (45), pp. 33–35.
13. Гун Г.С., Чукин М.В., Рубин Г.Ш. Управление качеством в метизном производстве // Металлургические процессы и оборудование / ООО «Технопарк Дон ГТУ «УНИТЕКС» (Донецк, Украина). 2013. № 4(34). С. 106–112.
14. Управление качеством продукции в технологиях метизного производства: монография / Корчунов А.Г., Чукин М.В., Гун Г.С., Полякова М.А. М.: Издательский дом «Руда и металлы», 2012. 164 с.
15. Разработка теории квалиметрии метизного производства / Рубин Г.Ш., Чукин М.В., Гун Г.С., Закиров Д.М., Гун И.Г. // Черные металлы. 2012, июль. С. 15–21.
16. Научная деятельность ГОУ ВПО «МГТУ» в условиях развития нанотехнологий / Чукин М.В., Колокольцев В.М., Гун Г.С., Салганик В.М., Платов С.И. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2009. № 2 (26). С. 55–59.
17. Особенности реологических свойств конструкционных наносталей / Чукин М.В., Гун Г.С., Барышников М.П. и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2008. № 1. С. 24–27.
18. Создание и развитие теории квалиметрии металлургии / Гун Г.С., Рубин Г.Ш., Чукин М.В., Гун И.Г., Мезин И.Ю., Корчунов А.Г. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2003. № 5(45). С. 67–69.
19. Ресурсосбережение в метизном производстве: коллективная монография / Зюзин В.И., Клековкина Н.А., Харитонов В.А. и др. Магнитогорск, 2001. 163 с.
20. Гун Г.С., Пудов Е.А., Иванова Л.Б. Оптимизация процессов обработки металлов давлением по комплексному критерию качества // Изв. вузов. Черная металлургия. 1982. № 8. С. 62–65.
21. Голубчик Э.М., Чукин М.В., Кузнецова А.С. Разработка модели адаптивного управления качеством крепежных изделий на основе моделирования в среде Deform-3D // Сталь. 2014. № 4. С. 61–62.
22. Hong-Seok Park, Ngoc-Hien Tran. An autonomous manufacturing system for adapting to disturbances. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. October 2011, vol. 56, iss. 9–12, pp. 1159–1165.
23. Hong-Seok Park, Ngoc-Hien Tran. A cognitive agent based manufacturing system adapting to disturbances // International Journal of Control, Automation and Systems. August 2012, vol. 10, iss. 4, pp. 806–816.
24. Marc B. Sokol. Adaptation to difficult designs: Facilitating use of new technology // Journal of Business and Psychology. Spring 1994, vol. 8, iss. 3, pp. 277–296.
25. Namwoon Kim, Jae H. Pae, Utilization of new technologies: organizational adaptation to business environments // Journal of the Academy of Marketing Science. June 2007, vol. 35, iss. 2, pp. 259–269.
26. Ulrich Müller Simulation of a real-time process adaptation in the manufacture of high-density fibreboards using multivariate regression analysis and feedforward control / Martin Riegler, Bernhard Spangl, Martin Weigl, Rupert Wimmer // Wood Science and Technology. July 2013.
27. Seid Žapčević, Peter Butala. Adaptive process control based on a self-learning mechanism in autonomous manufacturing systems // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. June 2013, vol. 66, iss. 9–12, pp. 1725–1743.
28. Claudio A. Policastro, André C. P. L. F. Carvalho, Alexandre C. B. Delbem. A hybrid case adaptation approach for case-based reasoning // Applied Intelligence. April 2008, vol. 28, iss. 2, pp. 101–119.
29. Голубчик Э.М. Адаптивное управление качеством металлопродукции // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. №1. С. 63–69.
30. Чукин М.В., Кузнецова А.С., Емалеева Д.Г. Анализ возможности производства крепежа повышенного класса прочности из углеродистой конструкционной стали с ультрамелкозернистой структурой // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2012. № 1. С. 41–45.
31. Чукин М.В., Кузнецова А.С., Барышников М.П. Определение возможности достижения высоких классов прочности болтов из углеродистой стали с ультрамелкозернистой структурой моделированием измерения твердости по Бринеллю // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 4. С. 150–152.

Материал поступил в редакцию 03.03.16.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-1-101-108

APPLICATION OF MODELS AND PRINCIPLES OF QUALITY INDICATOR TECHNOLOGICAL ADAPTATION IN METALWARE PRODUCTION PROCESSES

Golubchik Edward Mikhailovich – D.Sc. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: golub66@mail.ru;

Kuznetsova Alla Sergeyevna – Research Assistant, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: allakuznetsova.mgtu@mail.ru;

Rubin Gennady Shmulievich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: rubingsh@gmail.com;

Gun Gennady Semionovich – D.Sc. (Eng.), Professor, Adviser to the Rector of Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7 (3519) 29-85-26. E-mail: mgtu@magtu.ru.

Dyja Henryk – D.Sc. (Eng.), Professor, Director of the Institute of Metal Forming and Engineering Security, Czestochowa University of Technology, Poland. E-mail: dyja@wip.pcz.pl.

Abstract. Currently, there is a tendency in strengthening consumers' requirements for metal products. That is why metalware manufacturers have to be able to promptly adjust to changing market conditions in order to increase their competitive strengths, which is especially critical for the metalware market. At the same time, technologies based on the application of new high-strength materials, UFG steels in particular, are gaining traction. Implementation of these materials in metalware production implies the application of new state-of-the-art methods and approaches to research in the technological process. NMSTU scientists have elaborated a new adaptive quality management methodology for metalware products with a vast scope of application which provides for possible process engineering with a firm assurance of rated quality level under the conditions of apriori information incompleteness. The study aimed at the development and exploration of production process of high-strength fasteners made from 20&45 grade UFG steels at the premises of "MMK-METIZ" OJSC. This article presents the results of integrated investigations of the new methodology applicability as exemplified in the development of M10&M16 bolt cold forging technology.

Keywords: Adaptive quality management, forecasting, fasteners, strength, ultra-fine grain (UFG) structure.

References

1. Korchunov A.G., Chukin M.V., Polyakova M.A. Design philosophy of the continuous process of UFG steel wire production. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2011, no. 1, pp. 43–46.
2. Chukin M.V., Polyakova M.A., Gulin A.E., Yemaleeva D.G. Influence of combined methods of deformation processing on mechanical properties of carbon wire. *Chiomye metally* [Ferrous metals], 2014, no. 12, pp. 35–39.
3. Chukin M.V., Koptseva N.V., Valiev R.Z., Yakovleva I.L., Zmrik G., Covarik T. Diffraction electron-microscopic analysis of the submicrocrystalline and nanocrystalline structure of constructional carbon steels after equal channel angular pressing and further deformation. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2008, no. 1, pp. 31–37.
4. Chukin M., Koptseva N., Barushnikov M., Yefimova Y., Nosov A., Noskov S., Kolomiets B. Innovative potential of new metalware production technologies from nanostructured steels. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2009, no. 2, pp. 64–68.
5. Yefimova Yu.Yu., Koptseva N.V., Nikitenko O.A. Investigation of the state of the carbide phase after nanostructuring and subsequent drawing of low carbon steel. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2009, no. 3, pp. 45–48.
6. Koptseva N.V., Mikhlenko D.A., Yefimova Yu.Yu. Evolution of the microstructure and properties when heating ferrite-perlite carbon constructional steel with the ultra-fine grain structure generated by intensive plastic deformation. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Vestnik of Voronezh State Technical University], 2011, vol. 7, no. 9, pp. 85–91.
7. Gun G.S., Chukin M.V., Rubin G.Sh., Mezin I.Yu., Korchunov A.G. Current issues of metalware production qualimetry during the rise of the sixth technological wave. *Metallurg* [Metallurgist], 2014, no. 4, pp. 92–95.
8. Chukin M.V., Gun G.S., Korchunov A.G., Polyakova M.A. Prospects for high-strength steel reinforcement bars for new-generation ferroconcrete sleepers based on thermal and deformational nanostructuring. *Chemaya metallurgiya: Byulleten Chernetinformatsii* [Ferrous Metallurgy. Bulletin of Chernetinformatsia], 2012, vol. 4, pp. 100–105.
9. Chukin M.V., Golubchik E.M., Gun G.S., Koptseva N.V., Yefimova Yu.Yu., Chukin D.M., Matushkin A.N. Study of physical and mechanical properties and the structure of high-strength new-generation general-purpose invar alloys. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2014, no. 1 (45), pp. 43–48.
10. G.S. Gun, I.Yu. Mezin, G.Sh. Rubin, A.A. Minaev, A.E. Nazaibekov, H. Dya. Research genesis in the field of steel products quality. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2014, no. 1 (45), pp. 92–97.
11. Gun G.S., Mezin I.Yu., Korchunov A.G., Chukin M.V., Gun I.G., Rubin G.Sh. Educational research school of Nosov Magnitogorsk State Technical University in product and industrial process quality management. *Kachestvo v obrabotke materialo* [Quality in materials processing], 2014, no. 1, pp. 5–8.
12. Chukin M.V., Korchunov A.G., Gun G.S., Polyakova M.A., Koptseva N.V. Nanodimensional structural part formation in high carbon steel by thermal and deformation processing. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2013, no. 5 (45), pp. 33–35.
13. Gun G.S., Chukin M.V., Rubin G.Sh. Quality management in metalware production. *Metallurgicheskie protsessy i oborudovanie* [Metallurgical processes and equipment]. Tekhnopark Don GTU UNITEKS LLC (Donetsk, Ukraine). 2013, no. 4 (34), pp. 106–112.
14. Korchunov A.G., Chukin M.V., Gun G.S., Polyakova M.A. *Upravlenie kachestvom produktsii v tekhnologiiakh metiznogo proizvodstva* [Product quality management in metalware production technologies: monograph]. Moscow: Ore and metals, 2012, 164 p.
15. Rubin G.Sh., Chukin M.V., Gun G.S., Zakirov D.M., Gun I.G. Development of the metalware production qualimetry theory. *Chiomye metally* [Ferrous Metals], July 2012, pp. 15–21.
16. Chukin M.V., Kolokoltsev V.M., Gun G.S., Salganik V.M., Platov S.I. Scientific activities of the State Educational Institution of Higher Professional Education "Magnitogorsk State Technical University" under the nanotechnology development conditions. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2009, no. 2 (26), pp. 55–59.
17. Peculiarities of rheological properties of constructional nanosteels. Chukin M.V., Gun G.S., Baryshnikov M.P. and colleagues. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2008, no. 1, pp. 24–27.
18. Metallurgy qualimetry theory design and development / G.S. Gun, G.Sh. Rubin, M.V. Chukin, I.G. Gun, I.U. Mezin, A.G. Korchunov. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2013, no. 5 (45), pp. 67–69.

19. Zyuzin V.I., Radionova L.V., Radionov A.A. and colleagues. *Resursoberezhenie v metiznom proizvodstve* [Resource saving in metalware production], Magnitogorsk, NMSTU, 2001, 160 p.
20. Gun G.S., Pudov E.A., Ivanova L.B. [Optimization of Metal Forming Processes with an Integrated Quality Criterion]. *Izvestiya vuzov. Chiomaia Metallurgiya* [Bulletin of Higher Educational Institutions. Ferrous Metallurgy], 1982, no. 8, pp. 62–65.
21. Chukin M.V., Golubchik E.M., Kuznetsova A.S. Development of a model of an adaptive quality management of fasteners on the basis of DEFORM-3D modeling. *Stal* [Steel], 2014, no. 4, pp. 61–66.
22. Hong-Seok Park, Ngoc-Hien Tran. An autonomous manufacturing system for adapting to disturbances. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. October 2011, vol. 56, iss. 9-12, pp. 1159–1165.
23. Hong-Seok Park, Ngoc-Hien Tran. A cognitive agent based manufacturing system adapting to disturbances. *International Journal of Control, Automation and Systems*. August 2012, vol. 10, iss. 4, pp. 806-816.
24. Marc B. Sokol. Adaptation to difficult designs: Facilitating use of new technology. *Journal of Business and Psychology*. Spring 1994, vol. 8, iss. 3, pp. 277–296.
25. Namwoon Kim, Jae H. Pae, Utilization of new technologies: organizational adaptation to business environments. *Journal of the Academy of Marketing Science*. June 2007, vol. 35, iss. 2, pp. 259–269.
26. Martin Riegler, Bernhard Spangl, Martin Weigl, Rupert Wimmer, Ulrich Müller Simulation of a real-time process adaptation in the manufacture of high-density fibreboards using multivariate regression analysis and feedforward control. *Wood Science and Technology*. July 2013.
27. Seid Žapčević, Peter Butala. Adaptive process control based on a self-learning mechanism in autonomous manufacturing systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. June 2013, vol. 66, iss. 9-12, pp. 1725–1743.
28. Claudio A. Policastro, André C. P. L. F. Carvalho, Alexandre C. B. Delbem. A hybrid case adaptation approach for case-based reasoning. *Applied Intelligence*. April 2008, vol. 28, iss. 2, pp 101-119.
29. Golubchik E.M. Adaptive control of metal products quality. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*. [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2014, no. 1, pp. 63–68.
30. Chukin M.V., Kuznetsova A.S., Yemaleyeva D.G. Analysis of the ability to produce high-strength grade fasteners made of carbon structural steels with an ultra-fine grain structure. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem* [Die Forging Production. Metal Forming], 2012, no. 1, pp. 41–45.
31. Chukin M.V., Kuznetsova A.S., Baryshnikov M.P. Determination of a possibility to obtain high-strength bolts made from carbon steel with an ultra-fine grain structure by Brinell hardness test modelling. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Vestnik of Voronezh State Technical University], 2012, vol. 8, no. 4, pp. 150–152.

Методология модернизации технологии горячей объемной штамповки алюминиевых сплавов методом компьютерного моделирования / Голубчик Э.М., Кузнецова А.С., Рубин Г.Ш., Гун Г.С., Дья Х. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14. №1. С. 101–108. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-1-101-108

Golubchik E.M., Kuznetsova A.S., Rubin G.Sh., Gun G.S., Dyja H. Application of models and principles of quality indicator technological adaptation in metalware production processes. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 1, pp. 101–108. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-1-101-108

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

УДК 532.542

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-1-109-115

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕНСИФИЦИРОВАННОГО ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМ ТЕЧЕНИИ В ПРОДОЛЬНО ОМЫВАЕМЫХ ПУЧКАХ ТРУБ С ПОПЕРЕЧНЫМИ КОЛЬЦЕВЫМИ КАНАВКАМИ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПАУНДНОЙ ТРЁХСЛОЙНОЙ МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

Лобанов И.Е.

Московский Авиационный институт (государственный технический университет), Москва, Россия

Аннотация. Цель исследования состоит в разработке теоретической модели для расчёта теплообмена при турбулентном течении в каналах в продольно оmyаемых пучках труб с поперечными кольцевыми канавками. Гипотеза, использованная в статье, основывается на четырёхслойном моделировании турбулентного пограничного слоя в пространстве между отдельными кольцевыми канавками в шестиугольном канале, заменённом эквивалентным кольцевым каналом, и использовании интегральных соотношений для турбулентных пограничных слоёв для пространства в отдельных канавках. Метод решения состоит в получении аналитических соотношений относительно интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в продольно обтекаемых пучках труб с поперечными кольцевыми канавками в зависимости от геометрических характеристик поперечных кольцевых канавок, параметров продольно обтекаемого пучка труб с поперечными кольцевыми канавками, режима течения теплоносителя. Полученные зависимости преимущественно различаются от полученных ранее решений более широкой общностью и верифицируемостью, а также тем, что при их выводе было принято гораздо меньшее число допущений. Полученные результаты расчёта в зависимости от широкого диапазона определяющих параметров, как геометрии продольно обтекаемого пучка труб с поперечными кольцевыми канавками, так и режима течения теплоносителя, хорошо коррелируют с существующими экспериментальными данными, однако, они также применимы и в более широком диапазоне определяющих параметров, поскольку основываются на допущениях, которые имеют очень широкую общность. Применение результатов исследования позволило: улучшить массогабаритные показатели теплообменных аппаратов современного металлургического производства, повысить их тепловую эффективность, снизить гидравлические потери на прокачку теплоносителя, понизить температуру стенок теплообменника.

Ключевые слова: моделирование, математическое, теплообмен, интенсификация, турбулентный, течение, труба, пучок, пограничный слой, компандный, кольцевые канавки.

Введение

Продольное оmyвание находит применение в теплообменных аппаратах при высоких скоростях течения и большой плотности теплоносителя в межтрубном пространстве, а также в случае применения в чистом виде противоточной схемы, возможной только при осевом течении обоих теплоносителей, где наиболее полно выполняется требование максимального использования температурного напора. Оптимальность использования продольного оmyвания в турбулентной области объясняется тем, что при турбулентном течении теплоносителя теплоотдача пропорциональна $\sim Re^{0,8}$, в то время как при поперечном она пропорциональна $\sim Re^{0,6}$. Следовательно, при относительно высоких числах Рейнольдса теплоотдача при продольном обтекании пучков труб будет преобладать над поперечным. Для увеличения компактности необходимо интенсифицировать теплообмен не только в межтрубном пространстве с помощью различного рода оребрения, но и промывать т.н. тесные пучки труб, т.е. с

относительным шагом труб в пучке $S/D \leq 1,2$. Вышеуказанные способы уменьшения габаритных размеров трубчатых теплообменников противоречат друг другу. Применение наружного оребрения увеличивает размеры трубок и препятствует созданию тесных трубных пучков, но использование тесных пучков мешает наружному оребрению трубок и делает его низкоэффективным из-за большого роста гидравлического сопротивления пучка. Вышеприведённые соображения обуславливают создание такого способа интенсификации теплообмена при продольном омывании пучков труб, который бы не увеличивал наружный диаметр трубок, т.е. который позволил бы применить эти трубки в тесных пучках, следовательно, трубки с кольцевыми поперечными канавками, изготовленными накаткой, удовлетворяют вышеуказанным требованиям. Углубления, образующиеся на наружной поверхности трубок, способствуют турбулизации пристеночного слоя и интенсификации теплообмена. При наружном омывании труб данный способ интенсификации теплообмена имеет основные преимущества по сравнению с другими способами интенсификации теплообмена: а) применим в тесных пучках труб: не увеличивает наружного диаметра трубок; б) образование внутри диафрагмы после накатки снаружи кольцевых канавок существенно интенсифицирует теплообмен в трубе; в) несложен в технологическом отношении; г) применим при больших плотностях тепловых потоков; д) позволяет не изменять существующую технологию сборки трубчатых теплообменных аппаратов.

Механизм интенсификации теплообмена с помощью кольцевых канавок на внутренней трубе можно объяснить следующим образом [1–3]. Применение поперечных канавок для интенсификации теплообмена при продольном обтекании пучков труб рационально при $S/D=1,2 \div 1,3$ [1–3], но при $S/D > 1,3$ оптимальная интенсификация в межтрубном пространстве обеспечивается при высоких турбулизаторах внутри трубы, т.е. при значительных потерях давления внутри трубы, а оптимальная интенсификация внутри труб детерминирует малую интенсификацию снаружи труб. Следовательно, в относительно раздвинутых продольно оmyваемых пучках труб с $S/D=1,3 \div 1,5$ применение поперечных кольцевых канавок менее эффективно, чем применение турбулизаторов.

Применение интенсификации теплообмена позволяет улучшить массогабаритные показатели теплообменных аппаратов современного металлургического производства, повысить их тепловую эффективность, снизить гидравлические потери на прокачку теплоносителя, понизить температуру стенок теплообменника.

Математическая модель теплообмена в продольно оmyваемых пучках труб с поперечными кольцевыми канавками

Теплообмен и трение в рассматриваемых модельных условиях в продольно оmyваемых пучках труб с поперечными кольцевыми канавками рассчитываются отдельно для канавок и для пространства между отдельными канавками, а затем осредняются. Предполагается, что пограничные слои между отдельными канавками и в канавках развиваются независимо друг от друга, но наличие канавок турбулизует пространство между отдельными канавками. Моделирование интенсифицированного теплообмена в канавке в кольцевом канале аналогично методам, представленным в [4–6] для канавок при применении в кольцевых каналах комбинированных турбулизаторов типа «выступ-канавка» и кольцевых канавок соответственно, для «шестиугольной» модели для продольно обтекаемых пучков труб с турбулизаторами. т.е. как и в основе работ [4, 6, 7], поэтому в рамках данной статьи не стоит подробно останавливаться на неспецифических аспектах этой модели, а рассмотреть только специфические особенности применяемой модели.

Присутствие канавок турбулизует пространство между отдельными канавками; отрывными течениями в канавках генерируются турбулентные вихревые возмущения, интенсифицируя теплоотдачу между потоком и стенкой. Рециркуляция вихрей и турбулизация течения в канавках поддерживаются за счёт энергии основного потока, поэтому с увеличением глубины канавок перманентно повышается сопротивление канала.

Моделирование влияния канавок на интенсифицированный теплообмен в пространстве между отдельными канавками, так же как и для случаев с канавками кольцевого канала, может быть проведено на основе аналогии воздействия турбулизаторов на турбулентный пограничный слой: поток между отдельными канавками, как и случае с выступами, разбивается на подслои, относительная стратификация которых аналогична течению в канале с дискретными поверхностно расположенными турбулизаторами потока. Следовательно, для продольно обтекаемых труб с поперечными кольцевыми канавками «шестиугольной» трёхслойной модели турбулентного пограничного слоя, поскольку формально «высота» турбулизующего элемента, т.е. канавки, меньше высоты промежуточного подслоя. В

дальнейшем расчёт интенсифицированного теплообмена между отдельными канавками в продольно обтекаемом пучке с поперечными кольцевыми канавками проводится так же, как и в работе [4] для трёхслойной схемы турбулентного пограничного слоя.

Остановимся только на специфических аспектах моделирования. Рассматриваются пучки труб с шахматным расположением. Аналогично случаю моделирования потока при продольном обтекании пучков труб с турбулизаторами «шестиугольной» семислойной схемой турбулентного пограничного слоя [4, 6, 7] проведём послойное деление потока при продольном обтекании труб с кольцевыми поперечно расположенными кольцевыми канавками для модельного «шестиугольного» канала, заменённого эквивалентным кольцевым каналом с подвижными внешними границами и канавками на внутренней трубе следующими соотношениями для турбулентной и молекулярной вязкостей и профилей скорости соответственно.

1. Вязкий подслой, расположенный в окрестности $(R_1 = \sqrt{\pi}/(\sqrt{2}\sqrt[4]{3})(S/D)^{-1})$:

$$R \in [R_1; R_1 + (5/Re)\sqrt{32/\xi}]:$$

$$\mu_T/\mu = (\beta_1/25)Re^3(R - R_1)^3(\xi/32)^{\frac{3}{2}}; \quad (1)$$

$$w_x/\bar{w}_x = (\xi/16)Re(R - R_1). \quad (2)$$

2. Промежуточный подслой, расположенный в окрестности:

$$R \in [R_1 + (5/Re)\sqrt{32/\xi}; R_1 + (30/Re)\sqrt{32/\xi}]:$$

$$\mu_T/\mu = (Re/5)(R - R_1)\sqrt{\xi/32} - 1; \quad (3)$$

$$w_x/\bar{w}_x = 5\sqrt{\xi/8}\left(1 + \ln\left((Re/5)(R - R_1)\sqrt{\xi/32}\right)\right). \quad (4)$$

3. Турбулентное ядро, расположенное в окрестности $R \in [R_1 + (30/Re)\sqrt{32/\xi}; 1]$:

$$\mu_T/\mu = \sigma Re; \quad (5)$$

$$w_x/\bar{w}_x = (1,325\sqrt{\xi} + 1) \cdot (R - R_1)^{\sqrt{\xi}}. \quad (6)$$

Для расчёта интенсифицированного теплообмена между отдельными канавками по вышеприведённой «шестиугольной» трёхслойной модели потока гидравлическое сопротивление трению принимается либо из имеющихся экспериментальных данных, либо по существующим эмпирическим соотношениям. В качестве первого приближения, а также в случае отсутствия достаточной информации, могут быть взяты значения гидравлического сопротивления и теплообмена для пространства между отдельными кольцевыми канавками в продольно обтекаемых пучках труб с кольцевыми канавками, характерные соответствующему каналу без выступов и канавок. Прежде всего необходимо детерминировать определяющий размер d_{∞} [1–3]:

$$d_{\infty} = D \cdot (C_{\infty} \cdot (S/D)^2 - 1). \quad (7)$$

Как уже отмечалось, для расчёта интенсифицированного теплообмена между отдельными канавками по данной «шестиугольной» трёхслойной модели потока гидравлическое сопротивление может быть принято, исходя из эмпирических формул, одними из самых надёжных могут быть приняты следующие [1–3]:

$$\frac{\xi}{\xi_{\text{гл}}} = 1 + \left\{ 7,55 \frac{h}{d_{\infty}} (\lg Re - 3,5) - 0,035 \sin \left[\left(1 - 22,44 \frac{h}{d_{\infty}} \right) \cdot \pi \right] \right\} \left(1,40 - 0,488 \frac{t}{d_{\infty}} \right),$$

$$\forall S/D = 1,16 \div 1,5, \quad Re = 3,1 \cdot 10^3 \div 2 \cdot 10^4, \quad h/d_{\infty} = 0 \div 0,1, \quad t/d_{\infty} = 0,25 \div 2; \quad (8)$$

$$\frac{\xi}{\xi_{\text{гл}}} = 1 + \left(1,40 - 0,488 \frac{t}{d_{\infty}} \right) \left\{ 3,21 \frac{h}{d_{\infty}} (\lg \text{Re} - 2,27) + 0,09 \cdot (\lg \text{Re} - 4,3) \sin \left[\left(1 - 22,44 \frac{h}{d_{\infty}} \right) \cdot \pi \right] \right\},$$

$$\forall S/D = 1,16 \div 1,5, \quad \text{Re} = 2 \cdot 10^4 \div 10^5, \quad h/d_{\infty} = 0 \div 0,1, \quad t/d_{\infty} = 0,25 \div 2. \quad (9)$$

Для гладких продольно обтекаемых пучков труб в формулах (8)–(9) гидравлическое сопротивление рассчитывается по следующей формуле [1–3]:

$$\xi_{\text{гл}} = (0,316 \cdot (S/D) - 0,176) \cdot \text{Re}^{-0,2}. \quad (10)$$

Моделирование интенсифицированного теплообмена в канавке продольно обтекаемого пучка труб с поперечными кольцевыми канавками проводится на основе метода, успешно реализованного в [4, 6, 7] для комбинированных турбулизаторов типа «выступ-канавка» или собственно канавок, применяемых в кольцевых каналах. Данный подход был подробно изложен в [4, 6, 7] для расчёта интенсифицированного теплообмена в круглых трубах, кольцевых каналах и продольно обтекаемых пучках труб с поперечными кольцевыми канавками, поэтому в рамках данной статьи остановимся только на специфических аспектах модели. В дальнейшем получаемые соотношения приводятся к виду для относительных величин, используемых в экспериментальных работах и эмпирических соотношениях для теплообмена и гидравлического сопротивления для продольно обтекаемых пучков труб с поперечными кольцевыми канавками [1–2].

Осреднённая теплоотдача для турбулентного пограничного слоя в канавке для продольно обтекаемых труб с кольцевыми канавками рассматривается как для эквивалентного «шестиугольному» кольцевого канала с поперечными кольцевыми канавками на внутренней трубе на основе интегральных соотношений для турбулентных пограничных слоёв для характерного размера P , согласно [4]:

$$\overline{\text{St}} = 0,036 \cdot \text{Re}_p^{-0,2} \text{Pr}^{-0,75}. \quad (11)$$

Осреднённое число Нуссельта в турбулентном пограничном слое в канавке на основе интегральных соотношений для турбулентных пограничных слоёв [4]

$$\overline{\text{Nu}}_k = 0,01867 \cdot \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,25} (P/d_{\infty})^{0,8}. \quad (12)$$

Отношение периметра к эквивалентному диаметру для канавок полукруглого поперечного сечения, применяемых в продольно обтекаемых пучках труб с поперечными кольцевыми канавками:

$$P/d_s = \pi(h/d_{\infty}). \quad (13)$$

Осреднённое число Нуссельта для продольно обтекаемого пучка труб с поперечными кольцевыми канавками

$$\overline{\text{Nu}} = \overline{\text{Nu}}_c (1 - t_k/t) + \overline{\text{Nu}}_k (t/d_s)^{-1}. \quad (14)$$

В случае применения поперечных канавок полукруглого поперечного сечения в продольно обтекаемых пучках труб оно примет следующий вид:

$$\overline{\text{Nu}} = \overline{\text{Nu}}_c \left(1 - 2(h/d_{\infty})(t/d_{\infty})^{-1} \right) + \overline{\text{Nu}}_k (t/d_{\infty})^{-1}. \quad (15)$$

Преимущество вышеизложенного компаундного метода расчёта интенсифицированного теплообмена в продольно обтекаемых пучках труб с поперечными кольцевыми канавками от метода, разработанного в [4], заключается в том, что детерминирование интенсифицированного теплообмена в канавках было сделано с меньшим числом допущений, а расчёт теплообмена между отдельными канавками – по «шестиугольной» трёхслойной модели турбулентного пограничного, имеющей более широкий диапазон использования.

**Сопоставление математического моделирования интенсифицированного теплообмена
при турбулентном течении в продольно омываемых пучках труб
с поперечными кольцевыми канавками при применении компаундной «шестиугольной»
трёхслойной модели турбулентного пограничного слоя с экспериментом**

Расчётные данные по теплообмену в продольно обтекаемых пучках труб с поперечными кольцевыми канавками верифицируются эмпирическими, наиболее подробно представленными в [1–3]. Сравнительный анализ расчётных данных по интенсифицированному теплообмену в продольно обтекаемых пучках труб с поперечными кольцевыми канавками, полученных с применением компаундной «шестиугольной» трёхслойной модели турбулентного пограничного слоя, с экспериментальными показывает вполне удовлетворительную корреляцию теории с экспериментом [1–3] в широком диапазоне чисел Рейнольдса, геометрических параметров пучка труб (относительному шагу труб в пучке), геометрических параметров канавок (безразмерные глубина и шаг канавок). В дальнейшем сравнение расчётных данных следует провести не только с отдельными экспериментальными данными, но и с имеющимися соответствующими эмпирическими соотношениями.

Интенсифицированный теплообмен продольно обтекаемых пучков труб с поперечными кольцевыми канавками наиболее полно описывается эмпирическими соотношениями, приведёнными в [1–3] для чисел Прандтля $Pr=0,72 \div 11,2$:

$$\frac{Nu}{Nu_{гл}} = 1 + \frac{0,6 \cdot \left[1 - e^{-35,8 \frac{h}{d_{\infty}}} \right] \left(1 - 0,35 \frac{t}{d_{\infty}} \right) \left(\lg Re - \lg \left[\left(30 \frac{d}{D} - 26,4 \right) \cdot 10^4 \right] \right)}{\lg \left[\left(16,8 \frac{d}{D} - 12,1 \right) \cdot 10^4 \right] - \lg \left[\left(30 \frac{d}{D} - 26,4 \right) \cdot 10^4 \right]}, \quad (16)$$

$$\forall S/D = 1,16 \div 1,5, \quad Re_1 < Re < Re_2, \quad h/d_{\infty} = 0 \div 0,1, \quad t/d_{\infty} = 0,25 \div 2;$$

$$Nu/Nu_{гл} = 1 + 0,6 \cdot \left[1 - \exp(-35,8 h/d_{\infty}) \right] \left(1 - 0,35 t/d_{\infty} \right), \quad (17)$$

$$\forall S/D = 1,16 \div 1,5, \quad Re_2 < Re < 10^5, \quad h/d_{\infty} = 0 \div 0,1, \quad t/d_{\infty} = 0,25 \div 2,$$

$$Re_1 = (3,6 - 33,8 \cdot h/d_{\infty}) \cdot 10^4;$$

где $Re_2 = (4,7 - 18,85 \cdot h/d_{\infty}) \cdot 10^4.$

Для гладких продольно обтекаемых пучков труб в формулах (16)–(17) теплообмен рассчитывается по следующей формуле [1–3]:

$$Nu_{гл} = (0,032(S/D) - 0,0144) Re^{0,8} Pr^{1/3}. \quad (18)$$

Сравнение теоретических данных по интенсифицированному теплообмену с эмпирическими для продольно обтекаемых пучков труб с поперечными кольцевыми канавками при $S/D=1,2$; $t/d_{\infty}=1$; $h/d_{\infty}=1,2$; $Pr=0,72$ для различных значений числа Рейнольдса $Re=9 \cdot 10^3 \div 5,1 \cdot 10^4$ показывает их вполне удовлетворительную корреляцию. В дальнейшем необходимо провести сравнение теоретических расчётных данных с данными, полученными по эмпирическим зависимостям, для различных значений относительного шага между канавками при прочих равных условиях.

Сравнение теоретических данных по теплообмену с эмпирическими для продольно обтекаемых пучков труб с кольцевыми канавками при $S/D=1,2$; $h/d_{\infty}=1,2$; $Pr=0,72$; $Re=5 \cdot 10^4$ в зависимости от относительного шага между канавками $t/d_{\infty}=0,25 \div 2$ показывает хорошую корреляцию теоретического расчёта и расчёта по эмпирическим формулам во всём относительно широком рассматриваемом диапазоне определяющих параметров.

Теоретические данные, хорошо коррелируя с эмпирическими, имеют более широкий диапазон применения по отношению к эмпирическим формулам, поскольку основаны на допущениях, имеющих очень широкую общность.

Основные выводы

В рамках данной статьи была разработана компаундная математическая модель интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в продольно омываемых пучках труб с поперечными кольцевыми канавками, основанная на четырёхслойном моделировании турбулентного пограничного слоя в пространстве между отдельными кольцевыми канавками в шестиугольном канале, замённом эквивалентным кольцевым каналом, и использовании интегральных соотношений для турбулентных пограничных слоёв для пространства в отдельных канавках.

Получены аналитические соотношения относительно интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в продольно обтекаемых пучках труб с поперечными кольцевыми канавками в зависимости от геометрических характеристик поперечных кольцевых канавок (их глубины, взаимного расположения), параметров продольно обтекаемого пучка труб с поперечными кольцевыми канавками (относительного шага труб в пучке S/D), режима течения теплоносителя (чисел Рейнольдса и Прандтля).

Полученные зависимости преимущественно различаются от полученных ранее решений [4] более широкой общностью и верифицируемостью, а также тем, что при их выводе было принято гораздо меньшее число допущений.

Результаты расчёта в зависимости от широкого диапазона определяющих параметров, как геометрии продольно обтекаемого пучка труб с поперечными кольцевыми канавками, так и режима течения теплоносителя, хорошо коррелируют с существующими экспериментальными данными, однако, они также применимы и в более широком диапазоне определяющих параметров, поскольку основываются на допущениях, которые имеют очень широкую общность.

Интенсификация теплообмена обуславливает улучшение массогабаритных показателей теплообменных аппаратов современного металлургического производства, повышение их тепловой эффективности, снижение гидравлических потерь на прокачку теплоносителя, а также понижение температуры стенок теплообменника.

Обозначения: S – шаг между цилиндрами, D – диаметр цилиндра; S/D – относительный шаг цилиндров; d_{∞} – эквивалентный диаметр при бесконечном числе цилиндров в пучке; C_{∞} – константа (для коридорного пучка труб $C_{\infty}=1,273$, для шахматного – $C_{\infty}=1,102$); h – глубина канавки; d – диаметр кольцевой канавки; d/D – безразмерная глубина канавки; R – текущая радиальная координата; R_1 – радиус цилиндра; Re , Pr , Nu , St – критерии Рейнольдса, Прандтля, Нуссельта, Стентона; ξ – коэффициент гидросопротивления; t – шаг между канавками; t_K – шаг канавки; P – периметр поперечного сечения канавки; β_1 – константа в «степенном законе»; σ – константа, характеризующая начальную турбулентность; w_x – продольная скорость (черта сверху – среднерасходная); μ и μ_T – молекулярная и турбулентная динамическая вязкость.

Список литературы

1. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. М.: Машиностроение, 1972. 220 с.
2. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. М.: Машиностроение, 1990. 208 с.
3. Эффективные поверхности теплообмена / Э.К. Калинин, Г.А. Дрейцер, И.З. Копп и др. М.: Энергоатомиздат, 1998. 408 с.
4. Лобанов И.Е. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах: дис ... д-ра техн. наук. М., 2005. 632 с.
5. Лобанов И.Е. Теория интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в продольно омываемых пучках труб с поперечным оребрением с помощью «шестиугольной» четырёхслойной модели турбулентного пограничного слоя // Фундаментальные проблемы техники и технологии – Технология–2012: сб. тезисов и аннотаций научных докладов XV международной научно-технической конференции / под ред. А.В. Киричека и А.В. Морозовой; Технологический институт им. Н.Н. Поликарпова ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК», г. Орёл, 5–8 июня 2012. М.; Орёл: Издательский дом «Спектр», 2012. С. 224–225.
6. Лобанов И.Е., Штейн Л.М. Перспективные теплообменные аппараты с интенсифицированным теплообменом для металлургического производства. (Общая теория интенсифицированного теплообмена для теплообменных аппаратов, применяемых в современном металлургическом производстве.) в 4-х т. Т. III. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах с применением многослойных, супермногослойных и компаундных моделей турбулентного пограничного слоя. М.: МГАХиС, 2010. 288 с.
7. Лобанов И.Е. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в продольно омываемых пучках труб с поперечным оребрением на базе четырёхслойной модели турбулентного пограничного слоя // Тепловые процессы в технике. 2014. Т. 6. № 12. С. 531–537.

Материал поступил в редакцию 26.09.15.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-1-109-115

MATHEMATICAL MODELING OF THE INTENSIFIED HEAT TRANSFER AT A TURBULENT FLOW IN LONGITUDINAL-FLOW TUBE BUNDLES WITH LATERAL RING GROOVES WITH THE AID OF A COMPOUND THREE-LAYER MODEL OF THE TURBULENT BOUNDARY LAYER

Lobanov Igor Evgenievich – D.Sc. (Eng.), Senior Research Fellow, PNIL-204, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia. E-mail: lloobbaannooff@live.ru.

Abstract. The objective of the research is to develop a theoretical model of calculating heat transfer at a turbulent flow in the channels of longitudinal-flow tube bundles with lateral ring grooves. The hypothesis used in this article is based on a four-layer simulation of a turbulent boundary layer in the space between separate ring grooves in a hexagonal channel replaced with an equivalent ring channel, and the use of integral relations of turbulent boundary layers for the space in separate grooves. The method is to obtain analytical relations regarding the intensified heat transfer at a turbulent flow in longitudinal-flow tube bundles with lateral ring grooves, depending on geometric characteristics of lateral ring grooves, specifications of longitudinal-flow tube bundles with lateral ring grooves, and the flow pattern of the coolant. These dependencies mainly differ from earlier obtained solutions in a wider commonality and verifiability, with fewer assumptions made. The calculation results obtained correlate well with the available experimental data depending on a wide range of key parameters such as configuration of a longitudinal-flow tube bundle with lateral ring grooves and the coolant flow pattern. However, they are also applicable in a much broader range of key parameters since they are based on assumptions of a very broad commonality. Application of the results of the study made it possible to improve mass and dimension parameters of heat exchangers of the modern metallurgical industry, improve their thermal efficiency, reduce hydraulic coolant pumping losses, and lower the heat exchanger side-wall temperature.

Keywords: Hadfield modeling, mathematical, heat exchange, intensification, turbulent, flow, pipe, bundle, boundary layer, compound, ring grooves.

References

1. Kalinin E.K., Dreitser G.A., Yarkho S.A. *Intensifikatsiya teploobmena v kanalakh* [Enhancement of heat transfer in channels]. Moscow: Mashinostroenie, 1972. 220 p.
2. Kalinin E.K., Dreitser G.A., Yarkho S.A. *Intensifikatsiya teploobmena v kanalakh* [Enhancement of heat transfer in channels]. Moscow: Mashinostroenie, 1990. 208 p.
3. Kalinin E.K., Dreitser G.A., Kopp I.Z. and colleagues *Ehffektivnye poverkhnosti teploobmena* [Effective heat exchange surfaces]. Moscow: Energoatomizdat, 1998. 408 p.
4. Lobanov I.Ye. *Matematicheskoe modelirovanie intensifitsirovannogo teploobmena pri turbulentnom techenii v kanalakh: dissertatsiya doktora tekhnicheskikh nauk* [Mathematical modeling of intensified heat exchange at turbulent flows in channels: D.Sc. dissertation]. Moscow, 2005. 632 p.
5. Lobanov I.Ye. Theory of intensified heat exchange at turbulent flows in longitudinally-washed tube bundles with cross-ribbing using the "hexagonal" four-layer model of a turbulent boundary layer. *Fundamental'nye problemy tekhniki i tekhnologii – Tekhnologiya-2012: sb. tezisov i annotatsij nauchnykh dokladov XV mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii / pod red. A.V. Kiricheka i A.V. Morozovoj / Tekhnologicheskij institut im. N.N. Polikarpova FGBOU VPO «Gosuniversitet-UNPK», g. Oryol, 5–8 iyunya 2012* [Fundamental problems of engineering and technology – Technology-2012. Book of abstracts of the XV International Scientific and Technical Conference. Ed. A.V. Kirichek and A.V. Morozova; Institute of Technology named after N.N. Polikarpov. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "State University-UNPK", Orel, 5–8 June 2012]. Moscow; Orel: "Spectrum" Publishing house, 2012, pp. 224–225.
6. Lobanov I.Ye., Stein L.M. *Perspektivnye teploobmennye apparaty s intensifitsirovannym teploobmenom dlya metallurgicheskogo proizvodstva. (Obshchaya teoriya intensifitsirovannogo teploobmena dlya teploobmennyykh apparatov, primenyaemykh v sovremennom metallurgicheskom proizvodstve.) v 4-kh t. T. III. Matematicheskoe modelirovanie intensifitsirovannogo teploobmena pri turbulentnom techenii v kanalakh s primeneniem mnogosloynnykh, supermnogosloynnykh i kompaundnykh modelej turbulentnogo pogranichnogo sloya* [Advance heat exchangers with intensified heat exchange for metals practice (General Theory of intensified heat exchange for heat exchangers used in a modern metals practice). In 4 volumes. Volume III. Mathematical modeling of intensified heat exchange at turbulent flows in channels using multi-layer, super-multi-layer and compound models of a turbulent boundary layer]. Moscow: MGAKH&S, 2010. 288 p.
7. Lobanov I.Ye. Mathematical modeling of intensified heat transfer at a turbulent flow in longitudinally-washed tube bundles with cross-ribbing on the basis of a four-layer model of a turbulent boundary layer. *Teplovye protsessy v tekhnike* [Thermal processes in engineering]. 2014, vol. 6, no. 12, pp. 531–537.

Лобанов И.Е. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в продольно омываемых пучках труб с поперечными кольцевыми канавками с применением компаундной трёхслойной модели турбулентного пограничного слоя // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14. №1. С. 109–115. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-1-109-115

Lobanov I.E. Mathematical modeling of the intensified heat transfer at a turbulent flow in longitudinal-flow tube bundles with lateral ring grooves with the aid of a compound three-layer model of the turbulent boundary layer. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 1, pp. 109–115. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-1-109-115

УЧЕБНО-КОНСУЛЬТАЦИОННАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ ПРОГРАММА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Портянкин А.А., Тинькова С.М., Пискажова Т.В.

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

Аннотация. Специальные компьютерные программы повышают качество обучения за счет проведения большего количества операций за короткий промежуток времени, структурирования учебной информации на разных уровнях, систематизации процесса представления информации и организации интерактивного общения.

Целью работы является создание учебно-консультационного комплекса для преподавания курса теплотехники при подготовке специалистов горно-металлургической отрасли и решения типовых инженерных задач.

Программа имеет следующие функциональные возможности:

- выполнение статических расчетов: теплового потока и распределения температур по толщине плоской стенки, расчет толщины слоя стенки (при задании различных граничных условий);
- выполнение динамических расчетов: перераспределения температур, плавление и кристаллизация гарнисажа как одного из слоев стенки, при подаче различных воздействий;
- использование встроенных баз данных, необходимых для проведения расчетов и проверки их правильности;
- визуализация результатов в виде графиков и таблиц.

Компьютерная программа позволяет с помощью цветowych анимационных иллюстраций и графического изображения наглядно представить полученные результаты, предусматривает возможность интерактивного взаимодействия между пользователем и элементами программы, при этом обеспечивает мгновенный контроль за усвоением материала. Данная программа может быть использована также и для дистанционного обучения.

Программное обеспечение было реализовано в среде объектно-ориентированного программирования C++ Builder. При создании программы были использованы: теория теплопередачи, численные методы для решения обыкновенных дифференциальных уравнений.

Представленная программа опробована в процессе обучения бакалавров и магистрантов института цветных металлов и материаловедения СФУ по направлениям «Металлургия», «Автоматизация технологических процессов и производств», «Управление в технических системах».

Ключевые слова: многослойная стенка, гарнисаж, тепловой поток, теплопроводность, граничные условия.

Введение

Внедрение информационных технологий (ИТ) в процесс обучения инженерным предметам в настоящее время является недостаточным именно в области овладения специальными профессиональными компетенциями. Студенты пользуются в основном стандартным офисным программным обеспечением, предназначенным для решения общих задач и подготовки документов. Как следствие, по окончании вуза специалисты часто не имеют опыта работы с различными специализированными программами и не умеют прогнозировать влияние различных переменных процесса на исследуемый объект. Работодателю необходимо доучивать новых работников, что требует дополнительных вложений и времени. Исходя из этого, необходимо повышать уровень знаний будущих специалистов во время их обучения.

Эту задачу можно решить путем создания специализированного программного обеспечения и его внедрения в процесс подготовки будущих специалистов горно-металлургического комплекса.

Нами ведется разработка программного обеспечения, направленного на изучение и решение теплотехнических задач. Программа совмещает в себе не только возможность проведения консультационных расчетов, но и обладает высокой наглядностью представления материала, что в свою очередь предполагает инициацию всего процесса обучения, способствует повышению активности обучаемых через формирование мотивационной структуры учебно-познавательной деятельности.

В настоящее время существует много электронных обучающих систем и ресурсов, но немногие из них содержат встроенные процедуры, способные осуществлять инженерные расчеты. Имеются, конечно, широко известные

программы 3D-моделирования SolidWorks [1], Ansys [2], в которых можно выполнить большую часть интересующих нас теплотехнических расчетов, но для овладения этими программами нужно долго учиться, и расчеты в них длительные, что не всегда дает возможность быстро оценить результаты вводимого в объект изменения. Существует еще определенный класс учебно-консультационных программ, которые имитируют производственные процессы и объекты уже непосредственно для нужд производства – повышения квалификации, переподготовки, тренировки специалистов, а также для выполнения производственных расчетов [3, 4].

Целью нашей программы является:

- повышение уровня подготовки молодых специалистов;
- сокращение временных затрат при обучении на повторяющиеся вычислительные операции;
- визуализация полученных результатов;
- создание у обучающихся четкого представления о работе исследуемого объекта и понимания выполняемых расчетов.

Описание программного обеспечения

При изучении теплотехнических дисциплин студенты сталкиваются с задачами по определению переменных теплопередачи в многослойной стенке. Для того чтобы лучше представлять и понимать тепловые процессы, была создана эта специализированная программа. Благодаря визуализации результатов понимание и усвоение информации происходит качественнее.

Программное обеспечение обладает наглядностью представления материала (цвет, анимационные иллюстрации), предусматривает возможность интерактивного взаимодействия (электронные лабораторные, обеспечивает мгновенный контроль за усвоением материала). Программа может быть использована для дистанционного обучения.

Весь материал, необходимый для изучения дисциплины, систематизирован и собран в единое целое, что позволит улучшить качество проведения занятий, облегчит труд преподавателя, а также позволит студентам самостоятельно заниматься изучением дисциплины в неаудиторной обстановке.

После изучения материала на лекциях учащиеся приступают к выполнению следующих

лабораторных работ с использованием описываемого ПО:

- расчеты теплового потока и распределения температур по толщине плоской многослойной стенки при задании граничных условий 1-го и 3-го рода;
- расчет толщины третьего слоя стенки при задании граничных условий 1-го рода – выбор теплоизоляции;
- расчет толщины гарнисажа на внутренней стенке при задании граничных условий 3-го рода;
- динамический расчет изменения распределения температур слоев стенки при задании граничных условий 3-го рода;
- динамический расчет толщины гарнисажа на многослойной стенке при задании граничных условий 3-го рода.

Программа состоит из трех основных частей:

1. База данных по огнеупорным и теплоизоляционным материалам.
2. Математическое обеспечение, включающее уравнения и алгоритмы для расчетов стационарных потоков и температур и их динамических изменений при воздействиях.
3. Интерфейс пользователя, позволяющий вводить условия и видеть результаты расчетов.

Базы данных

Для задания теплофизических характеристик создана расширяемая база данных, которая позволяет осуществлять подбор материала для конструкции при задании различных исходных данных. Фрагмент базы представлен на **рис. 1**, где отражены теплофизические характеристики огнеупорных и теплоизоляционных материалов, такие как коэффициент теплопроводности λ , удельная теплоемкость c и плотность материалов R .

Коэффициент теплопроводности определяется по уравнению

$$\lambda = A + B \cdot T,$$

где A и B – константы для данного материала; T – температура материала, °С.

Удельная теплоемкость рассчитывается следующим образом:

$$c = C_1 + C_2 \cdot T,$$

где C_1 и C_2 – коэффициенты для определения теплоемкости; T – температура слоя, °С.

MATERIAL	A	B	C1	C2	R
Динас обычный	0,815	0,00067	870	0,193	1950
Динас высокоплотный	1,58	0,00038	870	0,193	2050
Многошамотные изделия	1,04	0,00015	865	0,21	2550
Шамот	0,7	0,00046	865	0,21	1900
Шамот класса А	0,88	0,00023	865	0,21	1850
Каолин плотный	1,75	0,00086	865	0,21	2450
Полукислые изделия	0,71	0,0007	868	0,19	2425
Совелитовый порошок (засыпка)	0,06	0,000116	920	0	500
ВГО-45	0,84	0,00058	835	0,25	2200
ВГО-62	1,76	-0,00023	835	0,25	2400
ВГО-72	1,76	-0,00023	835	0,25	2500
Муллит и корунд на глиняной связке	2,1	0,0018	795	0,21	2800
Муллит литой	2,8	-0,023	835	0,21	3000
Корунд литой	58	-0,029	880	0,21	3800
Магнезит	6,28	0,0027	1050	0,145	2700
Смолодоломит	1,86	-0,00078	1000	0	2775
Фостерит насадочный	4,23	-0,0016	900	0,21	2425
Фостерит обычный	1,63	-0,0007	900	0,21	2425
Шпинель	5,1	-0,0035	880	0	2875
Тальк	1,05	0,00031	677	0	2000
Периклазошпинелидные	4,17	-0,0011	920	0	3125
Хромомагнезит	2,8	-0,00087	920	0	2775
Магнезитохромит	4,1	-0,0016	920	0	2850
Цирконий	1,3	0,00046	540	0,12	3300
Циркон	2,1	-0,00093	530	0,125	3250
Карборунд рефракс	37,1	-0,0344	960	0,145	2100

Рис. 1. Фрагмент базы данных

Таким образом, использование базы дает возможность студенту перебрать разные материалы, например для футеровки металлургической печи и выбрать наиболее подходящий по необходимым параметрам.

Математическое обеспечение

Одной из задач является определение тепловых потоков через стенку. Если рассматривать металлургические печи, то величина этих потоков влияет на энергозатраты. Расчет тепловых потерь основан на уравнении теплопередачи [5]

$$q = k \cdot \Delta T,$$

где ΔT – разность температур; $k = 1 / \sum_{i=1}^n R$ – коэффициент теплопередачи; $\sum_{i=1}^n R$ – сумма тепловых сопротивлений системы.

Для определения распределения температур в многослойной стенке при стационарных условиях разработана программа, которая базируется

на методе «холодных сопротивлений» при стационарных условиях [6].

На рис. 2 в виде блок-схемы представлен алгоритм расчета стационарного профиля температур и тепловых потоков при граничных условиях первого рода. Также этот алгоритм позволяет определять коэффициенты теплопроводности, температуры на границах слоев и удельный тепловой поток.

При определении коэффициентов теплопроводности в зависимости от температуры материала используется итеративная процедура.

На рис. 3 представлен интерфейс программного продукта. Пользователь имеет возможность задавать теплофизические параметры стенки путем выбора материала из универсальной базы данных, различные граничные условия и размеры слоев стенки. Также интерфейс дает возможность графической визуализации и табличного представления результатов расчетов. На графике изображен температурный профиль в многослойной стенке, по горизонтальной оси представлена заданная толщина слоя стенки, по вертикальной – температура, °C, T_2 и T_3 – значения температур на границах слоев.

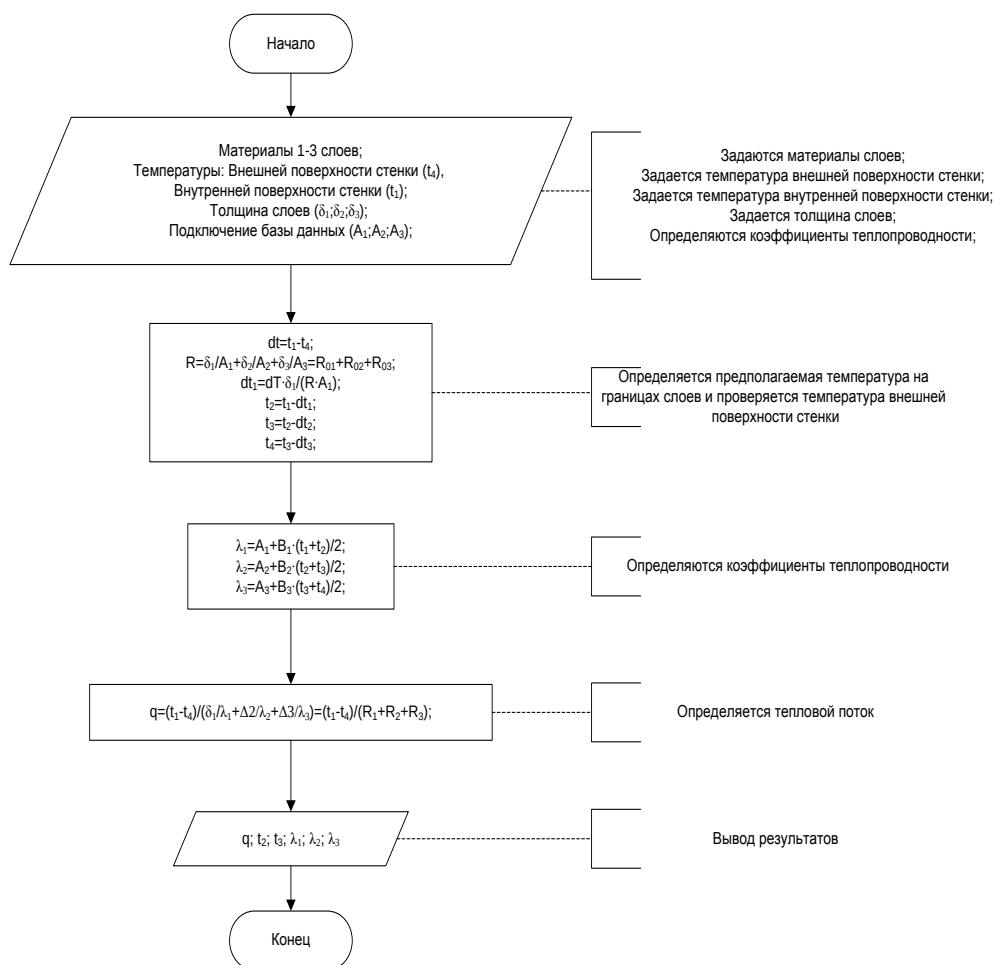


Рис. 2. Блок-схема для расчета теплового потока и распределения температуры по толщине плоской стенки

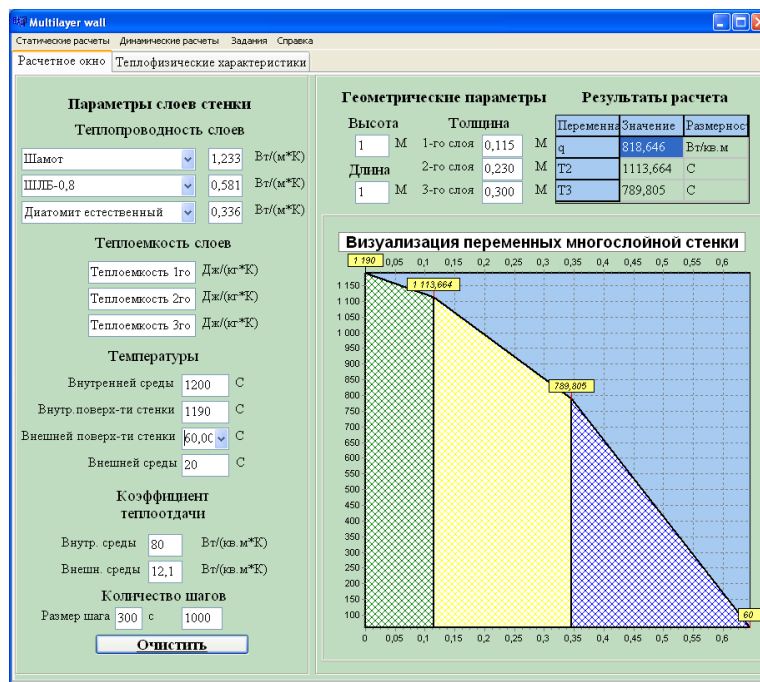


Рис. 3. Главная страница программы с исходными данными и результатами расчета

На производстве существует необходимость расчета толщины теплоизоляционного слоя с определенными температурными и размерными характеристиками. Для решения такой задачи в программе реализован алгоритм расчета толщины 3-го слоя стенки для выбранного материала.

Изучение нестационарных процессов в курсе теплотехники требует особой наглядности и визуализации, является предметом для научной работы студентов и углубленного изучения курса.

В программе реализована возможность расчета и анализа динамического изменения значений ряда переменных многослойной стенки в динамике, что позволяет наблюдать варьирование средних температур слоев, температур на их границах и поверхностей, толщины гарнисажа при различных воздействиях. Расчет средних температур слоев осуществляется по балансовому уравнению

$$m \cdot c \cdot \frac{d\bar{T}}{dt} = Q_{\text{вх}} - Q_{\text{вых}}.$$

При этом средние температуры в слоях рассчитываются следующим образом:

$$m_1 \cdot c_1 \cdot \frac{d\bar{T}_1}{dt} = S \cdot k_1 \cdot (T_1 - \bar{T}_1) - S \cdot k_{1-2} \cdot (\bar{T}_1 - \bar{T}_2);$$

$$m_2 \cdot c_2 \cdot \frac{d\bar{T}_2}{dt} = S \cdot k_{1-2} \cdot (\bar{T}_1 - \bar{T}_2) - S \cdot k_{2-3} \cdot (\bar{T}_2 - \bar{T}_3);$$

$$m_3 \cdot c_3 \cdot \frac{d\bar{T}_3}{dt} = S \cdot k_{2-3} \cdot (\bar{T}_2 - \bar{T}_3) - S \cdot \alpha_{\text{внеш}} \cdot (T_3 - T_{\text{возд}}),$$

где $Q_{\text{вх}}$ – входные тепловые потоки; $Q_{\text{вых}}$ – выходные тепловые потоки; m_n – масса слоев стенки; $c_{1,2,3}$ – удельная теплоемкость соответствующих

материалов стенки; $\frac{d\bar{T}}{dt}$ – скорость изменения

средней температуры слоя; S – площадь поверхности стенки; T_1 – температура внутренней поверхности стенки; $\bar{T}_{1,2,3}$ – средние температуры соответствующих слоев; $\alpha_{\text{внеш}}$ – коэффициент теплоотдачи во внешнюю среду; T_3 – температура границы между вторым и третьим слоем; $T_{\text{возд}}$ – температура внешней среды; $k_{1,2,3}$ – коэффициенты теплопередачи, которые рассчитываются по следующим формулам [7]:

$$k_1 = 2 \cdot \frac{\lambda_1}{\delta_1}; \quad k_{1-2} = \frac{2}{\left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}\right)}; \quad k_{2-3} = \frac{2}{\left(\frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}\right)}.$$

Здесь $\lambda_{1,2,3}$ – коэффициент теплопроводности материала соответствующего слоя; $\delta_{1,2,3}$ – толщина соответствующего слоя.

Значения температур на границах слоев определяются из условий равенства температур и потоков на границе раздела слоев.

На рис. 4 представлены результаты расчета динамического изменения средних температур слоев и температуры границ слоев стенки в результате резкого увеличения температуры внутренней поверхности стенки (например, с температуры 1700 до 1900°C), что реально может наблюдаться при работе ряда металлургических печей.

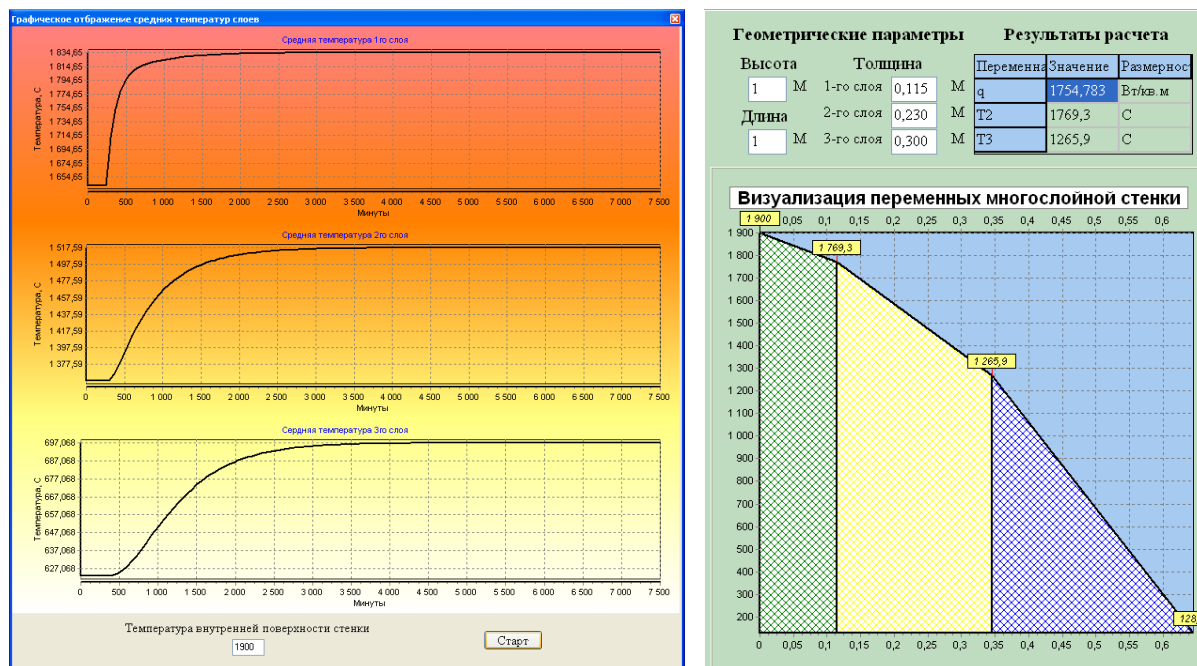


Рис. 4. Интерфейс для отображения расчетов динамического изменения температур стенки

Начальные, горизонтальные участки показывают среднюю температуру слоя к моменту воздействия, которое было подано на 240 минуте работы в установившемся режиме. В данном случае отчетливо видно, что изменение температуры первого слоя началось значительно раньше, чем у второго и третьего слоев.

Пользователь при изучении последствий тепловых воздействий может наблюдать за ходом изменения температур, определять время переходного процесса, зафиксировать распределение температур в определенный момент времени.

При управлении некоторыми металлургическими печами актуальной задачей является определение толщины гарнисажа [8]. Гарнисаж – твердый защитный слой, образующийся при плавке на внутренней (рабочей) поверхности стенок некоторых металлургических агрегатов, подвергающихся интенсивному охлаждению. При этом образуются тонкие корки застывших продуктов, толщина которых зависит от условий плавки и, особенно, от скорости охлаждения печи. Нами был реализован динамический расчет толщины гарнисажа при задании граничных условий третьего рода, с использованием следующего уравнения [7]:

$$\delta_{n+1} = 0,5 \cdot \left(\delta_n - \frac{dt \cdot \alpha_{\text{внут}} \cdot (T_0 - T_1)}{\rho_n \cdot L_n} \right) + \sqrt{0,25 \cdot \left(\delta_n - \frac{dt \cdot \alpha_{\text{внут}} \cdot (T_0 - T_1)}{\rho_n \cdot L_n} \right)^2 + \frac{2 \cdot dt \cdot \lambda_n \cdot (T_1 - \bar{T}_1)}{\rho_n \cdot L_n}},$$

где δ_n – толщина гарнисажа в данный момент времени; $\alpha_{\text{внут}}$ – коэффициент внутренней теплоотдачи; λ_n , ρ_n – коэффициенты теплопроводности и плотность гарнисажа соответственно; L_n – удельная теплота плавления гарнисажа; T_0 – температура внутренней среды; T_1 – температура ликвидуса расплава; $\bar{T}_1$ – средняя температура слоя гарнисажа; dt – шаг по времени.

На рис. 5 представлен результат по определению динамического изменения толщины гарнисажа при задании условий 3-го рода и подаче воздействия путем увеличения температуры ликвидуса расплава на 5 град.

Выводы

Таким образом, разработана учебно-консультационная программа, которая позволяет мобильно анализировать тепловые изменения в многослойной стенке при различных характеристиках материалов и подаваемых воздействиях, что в свою очередь экономит время и ресурсы для проведения подобных расчетов. Программа обладает высокой наглядностью, представляя расчетный материал как в табличном, так и в графическом виде; формирует у обучаемого видение зависимости параметров и переменных объекта при решении инженерных задач.

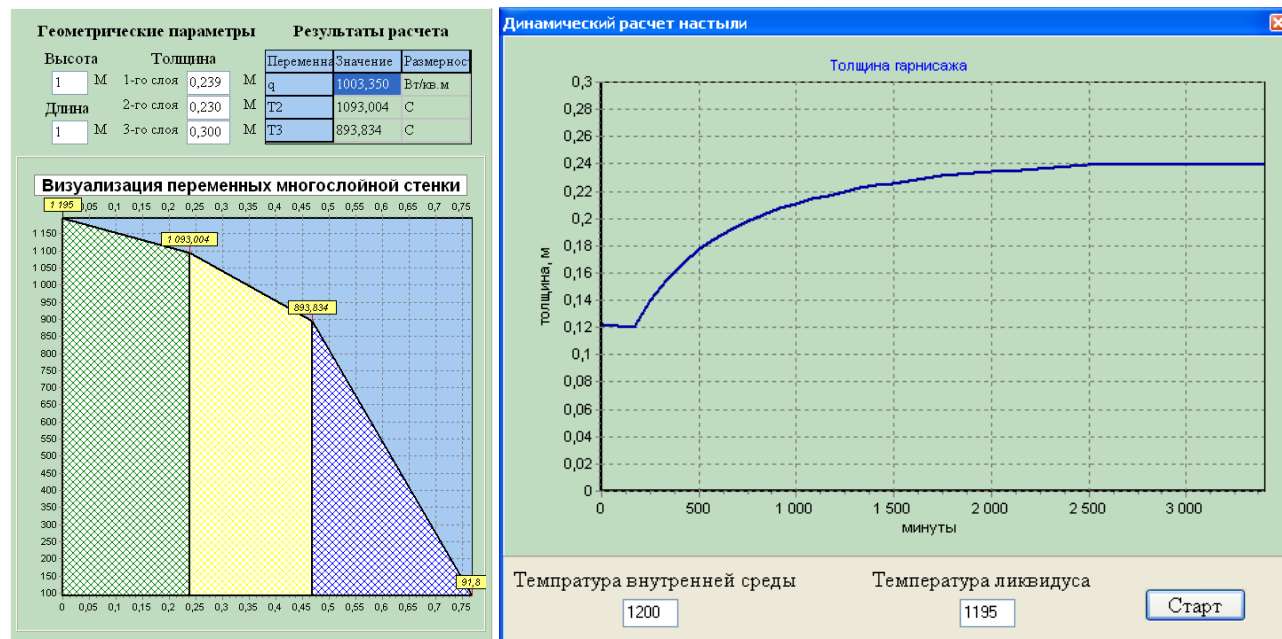


Рис. 5. Интерфейс для отображения результатов расчета изменения толщины гарнисажа

Список литературы

1. Официальный сайт SolidWorks [Электронный ресурс]. URL: <http://www.solidworks.ru> (дата обращения: 06.03.2014).
2. Официальный сайт Ansys [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ansys.com> (дата обращения: 06.03.2014).
3. Piskazhova T.V., Mann V.C. The Use of a Dynamic Aluminum Cell Model // JOM. 2006. Vol. 58, №2. P. 48–52.
4. Информационно-аналитический журнал Rational Enterprise Management // Имитационное моделирование как инструмент оптимизации производственных процессов в металлургии [Электронный ресурс]. URL: <http://www.anylogic.ru/upload/iblock/e56/e56ccf70ee38f9080c9bb7f69f2b5908.pdf> (дата обращения 07.04.2014).
5. Теплотехника металлургического производства. Т. 1: Теоретические основы: учеб. пособие для вузов / В.А. Кривандин [и др.]. М.: МИСиС, 2002.
6. Тинькова С.М. Металлургическая теплотехника. Красноярск: Государственный университет цветных металлов и золота, 2005. 143 с.
7. Белолипецкий В.М., Пискажова Т.В. Математическое моделирование процесса электролитического получения алюминия. Решение задач управления технологией. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2013. 271 с.
8. Chuck C., Chen J.J., Barry J. Modeling of Dynamic Ledge Heat Transfer // Light Metals. 1997. P. 309–317.
9. Арутюнов В.А., Бухмиров В.В., Крупеников С.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей. М.: Наука, 1990. 319 с.
10. Портянкин А.А., Тинькова С.М., Пискажова Т.В. // Конференция «Молодёжь и наука» [Molodezh i nauka] 2013г. [Электронный ресурс]. URL: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2013/thesis/s008/s008-007.pdf> (дата обращения: 06.03.2014).

Материал поступил в редакцию 20.07.15.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-1-116-123

TRAINING-SUPPORT SOFTWARE FOR STUDYING HEAT EXCHANGE PROCESSES

Portyankin Artem Aleksandrovich – Postgraduate Student, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: aaportyankin@gmail.com.

Tinkova Svetlana Mikhailovna – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

Piskazhova Tatiana Valerievna – D.Sc. (Eng.), Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: piskazhova@ya.ru.

Abstract. Special software improves the quality of training by processing many transactions in a short period of time, structuring learning information at different levels, organizing the presentation of information, and managing interactive communication.

The objective is to develop a training-support complex for teaching a course on Thermal Engineering when training specialists for mining and the metallurgical industry and solving common engineering problems.

The software has the following features:

- static calculation of heat flow and temperature distribution over the thickness of a flat side-wall, calculation of the side-wall layer thickness (with various boundary conditions);
- dynamic calculations of temperature redistribution, melting and side-ledge crystallization as one of the side-wall layers, when applying various impacts;
- use of embedded databases required to perform and verify calculations;
- Graphical and tabular rendering of the results.

The software makes it possible to render the results obtained using color illustrations and animated graphics, provides for conversational interaction between the user and software components, and at the same time, ensures instant control in developing the material delivered. It can be used for distance learning as well.

The software has been implemented in the C++ Builder environment. The theory of heat transfer and numerical

methods of solving ordinary differential equations were used to design the software.

The proposed software was trialed during the training of undergraduate and graduate students of the Institute of Nonferrous Metals and Materials Science of the Siberian Federal University majoring in Metallurgy, Automation of Technological Processes and Production, and Management in Technical Systems.

Keywords: Multi-layered wall, ledge, heat flow, thermal conductivity, boundary conditions.

References

1. The SolidWorks official website [electronic resource]. URL: <http://www.solidworks.ru> (accessed date: 03.06.2014).
2. The Ansys official website [electronic resource]. URL: <http://www.ansys.com> (accessed date: 03.06.2014).
3. Piskazhova T.V., Mann V.C. The Use of a Dynamic Aluminum Cell Model. JOM. 2006, vol. 58, no. 2, pp. 48–52.
4. Simulation modeling as a tool for optimization of production processes in the steel industry [electronic resource]. URL: <http://www.anylogic.ru/upload/iblock/e56/e56ccf70ee38f9080c9bb7f69f2b5908.pdf> (accessed date: 04.07.2014).
5. Krivandin V.A. *Teplotekhnika metallurgicheskogo proizvodstva. Tom 1: Teoreticheskie osnovy: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Heat engineering of metals practice. Vol. 1. Theoretical Foundations: Textbook for Universities]. Moscow: MISIS, 2002.
6. Tinkova S.M. *Metallurgicheskaya teplotekhnika* [Metallurgical heat engineering]. Krasnoyarsk: State University of Non-ferrous

- Metals and Gold, 2005. 143 p.
7. Belolipetsky V.M., Piskazhova T.V. *Matematicheskoe modelirovanie protsessa ehlektroliticheskogo polucheniya alyuminiya. Reshenie zadach upravleniya tekhnologiej* [Mathematical modeling of electrolytic production of aluminum. Meeting the challenges of technology management]. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2013. 271 p.
 8. Chuck C., John J.J. Chen, Barry J. Modeling of Dynamic Ledge Heat Transfeer. *Legkie metally* [Light Metals]. 1997, pp. 309–317.
 9. Arutyunov V.A., Bukhmirov V.V., Krupennikov S.A. Mathematical modeling of thermal performance of industrial furnaces. Moscow: Nauka, 1990. 319 p.
 10. Portyankin A.A., Tinkova S.M., Piskazhova T.V. "Youth and Science" Conference [Molodiozh i nauka] 2013. [Electronic resource]. URL: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2013/thesis/s008/s008-007.pdf> (accessed date 06.03.2014).

Портянкин А.А., Тинькова С.М., Пискажова Т.В. Учебно-консультационная компьютерная программа для изучения теплообменных процессов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14. №1. С. 116–123. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-1-116-123

Portyankin A.A., Piskazhova T.V., Tinkova S.M. Training-support software for studying heat exchange processes. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 1, pp. 116–123. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-1-116-123

ЭКОЛОГИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

УДК 574

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-1-124-129

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВНЕДРЕНИЯ
РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ БЕЗДОЛОМИТНОЙ ТЕХНОЛОГИИ
ПРОИЗВОДСТВА МОНОХРОМАТА НАТРИЯ
НА НОВОТРОИЦКОМ ЗАВОДЕ ХРОМОВЫХ СОЕДИНЕНИЙЧерчинцев В.Д.¹, Нефедова Е.В.², Козлов А.С.²¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия² Новотроицкий филиал НИТУ «МИСиС», Новотроицк, Россия

Аннотация. Приведены результаты энерго- и ресурсосбережения в результате внедрения инновационной технологии на Новотроицком заводе хромовых соединений (НЗХС). **Гипотеза исследования:** бездоломитная технология является экономически и экологически более выгодной относительно традиционной технологии получения монокромата натрия. **Цель исследования:** рассчитать динамику изменения энергозатрат, потерь хрома и выбросов загрязняющих веществ в ходе производства монокромата натрия на НЗХС. **Методы исследования:** анализ статистической информации.

Бездоломитная технология получения монокромата натрия, которая подразумевает отказ от инертного наполнителя за счет повторного использования нерудного остатка, была разработана специалистами НЗХС на основе разработок Т.Д. Авербуха и П.Г. Павлова.

В работе доказано, что переход на новую технологию позволил снизить себестоимость продукции ввиду отсутствия необходимости приобретения доломита и известняка (для нужд производства в год приобреталось до 160 тыс. тонн данного сырья); снижения энергозатрат и технических затрат на обслуживание оборудования при сушке и измельчении доломита; снижения потерь хрома с отходом производства – шламом монокромата натрия, а следовательно, и снижения нормы расхода хромовой руды на производство.

Расчеты, проведенные в работе, показали, что удельное потребление природного газа за 1 квартал 2015 года снизилось на 252,33 Гкал/т, годовая экономия – свыше 13,87 млн Гкал. Бездоломитная технология повлияла на существенное снижение образования токсичного шлама (на 9046 т/квартал – 37,6%) и потерь хрома в отходах производства (на 330,6 т/квартал – 25,2%).

Рассчитан экологический эффект от внедрения бездоломитной технологии, который заключается в снижении нормы выхода шлама с 2,5 до 1,1 т на тонну монокромата, а значит, и снижении объемов размещения отходов в шламонакопителе. Прекращение выбросов загрязняющих веществ от переделов производства, ранее ориентированных на применение доломита, – разгрузка и хранение сырья, его дробление и сушка, показало, что с увеличением объема производства монокромата натрия на 32,4% суммарный объем твердых выбросов снизился на 13,5%.

В целом, переход на бездоломитную технологию доказывает возможность реализации основных принципов рационального природопользования и перехода к устойчивому развитию на предприятии химической промышленности. Результаты, представленные в работе, показывают, что бездоломитная технология, по сравнению с консервативной, значительно превосходит ее в таких показателях, как энергоэффективность, экологичность, себестоимость при получении продукции. Также технология позволяет работать на хромосодержащем сырье практически всех мировых производителей, включая низкохромистые руды и концентраты.

Ключевые слова: хром, монокромат натрия, ресурсосберегающие технологии, шламы, энергозатраты.

Введение

Город Новотроицк Оренбургской области является крупным промышленным центром, в котором сконцентрированы предприятия горнодобывающего, металлургического, химического комплекса. ОАО «Новотроицкий завод

хромовых соединений» (НЗХС) – одно из градообразующих промышленных предприятий. Предприятие располагается на одной производственной площадке в северо-восточной промышленной зоне наряду с такими промышленными гигантами, как ОАО «Уральская Сталь», ОАО «Новотроицкий цементный завод». Высокий уровень загрязнения окружаю-

© Черчинцев В.Д., Нефедова Е.В., Козлов А.С., 2016

щей среды усугубляется вновь введенным цементным производством ООО «ЮУГПК» и накопленным за 60 лет металлургического производства шлакоотвалом [1, 2].

В городе наблюдается высокий уровень загрязнения атмосферного воздуха, почв, изменение ландшафтов за счет складирования отходов производства. Поэтому внедрение ресурсосберегающих и малоотходных производств – одна из важнейших задач, стоящих перед предприятиями. В 2015 году специалисты Новотроицкого завода хромовых соединений внедрили новую (бездоломитную) технологию производства монокромата натрия, что существенно снизило экологическую нагрузку на регион.

Производство хромовых соединений связано с выбросом загрязняющих веществ в атмосферный воздух (около 670 т в год), а также с образованием отходов производства – шлама монокромата натрия (около 180 тыс. т год). Действующий оборотный цикл водоснабжения исключает воздействие на водные объекты г. Новотроицка. Специфическими веществами, поступающими в атмосферу, являются выбросы соединений трехвалентного (33,32 т/год) и шестивалентного хрома (4,96 т/год).

Хром встречается в биологически подвижной (органические соединения) и минеральной формах. Токсичность соединения хрома находится в прямой зависимости от его валентности: наиболее ядовиты соединения хрома (VI), высокотоксичны соединения хрома (III), металлический хром и его соединения (II) – менее токсичны. Минеральный хром (III) может переводиться в биологически подвижную форму растениями и бактериями. Такая форма металла необходима всем живым организмам в малых количествах. Суточная потребность человека – это 50–200 мкг хрома. Если человек испытывает дефицит хрома, он быстро переутомляется, страдает от нарушения сна и головных болей, часто испытывает беспричинное беспокойство. Большие дозы данного металла токсичны для человека: при суточных дозах более 200 мкг может произойти отравление, а если доза превысит 3 г, то возможен и летальный исход [3].

Отходы НЗХС содержат крайне опасные для природы и человека соли хромовой кислоты, в частности хромат кальция. Отходы производства – это часть сырья, неиспользованная или недоиспользованная по тем или иным причинам. Проблема комплексного использования сырья имеет большое значение как с точки зрения экологии, так и с точки зрения экономики. Необходимость более рационального комплексного использования природных ресурсов диктуется, с одной стороны, все увеличивающимся темпом роста объема промышленного производства, загрязняющего окружающую

щую среду, а с другой – необходимостью экономного расходования природных ресурсов, так как запасы основного минерального сырья ограничены, а цены на него непрерывно растут.

Рациональное комплексное использование сырья позволяет уменьшить количество недоиспользованного сырья, увеличить ассортимент готовых продуктов, выпускать новые продукты из той части сырья, которая раньше являлась отходом производства [4].

Еще одна проблема химического производства – высокая энергоемкость. Поэтому на пути создания малоотходной технологии следует снижать энергоемкость [5].

Известны способы получения монокромата натрия путем окислительной прокали шихты, состоящей из хромитовой руды, кальцинированной соды и наполнителя. Существует несколько принципиальных подходов к выбору наполнителя.

В качестве наполнителя возможно использовать доломитно-шламовый наполнитель с последующим выщелачиванием полученного спека. Недостатком данного метода является необходимость дополнительной очистки монокромата от примесей, что повышает энергоемкость метода [6].

Существует способ получения монокромата натрия с использованием доломитового наполнителя [7]. Недостатком метода является необходимость очистки монокромата от соединений кальция, что повышает энергоемкость. Высокое содержание соды в шихте при окислительной прокатке шихты приводит к образованию настывов (колец) в трубчатых печах и остановке работы печей.

Другие исследователи в качестве наполнителя предлагают использовать известково-шламовый наполнитель с последующим двухстадийным выщелачиванием полученного спека обратными растворами, фильтрацией и очисткой фильтрата от примесей алюминия. Недостатком метода является то, что потери хрома составляют 10–20%, а степень извлечения хрома не достигает 90% [8].

До 2014 года на НЗХС осуществлялась доломитная технология производства монокромата натрия. Ко всем недостаткам этой технологии следует отнести образование большого количества шлама (отхода производства) – 2,5 т на 1 т монокромата.

Поэтому специалистами завода была разработана инновационная бездоломитная технология получения монокромата натрия. Изобретение относится к области получения соединений хрома. Способ получения монокромата натрия включает окислительную прокатку шихты, состоящей из хромитовой руды, кальцинированной соды и наполнителя, и последующее выщелачивание полученного спека, фильтрацию пульпы и отмывку

шлама. При этом в качестве наполнителя шихты используют магнезитовый или магнезитово-шламовый наполнитель. Изобретение позволяет упростить получение монокромата натрия за счет снижения плавкости шихты и содержания шестивалентного хрома в отбросном шламе, исключения операции очистки монокроматных щелоков от соединений кальция и образования отложений карбоната кальция на поверхности оборудования и трубопроводов, а также повысить чистоту монокромата натрия. [9].

Основная часть

В настоящее время ОАО «НЗХС» является одним из крупнейших предприятий, производящих хромовые соединения, не только на пространстве СНГ и Таможенного Союза, но и на мировой арене.

Продукция находит спрос в различных производственных направлениях.

На предприятии организован законченный цикл производства хромовых соединений, начиная от переработки хромовой руды в полупродукт – монокромат натрия, заканчивая получением металлического хрома высокой чистоты.

Производство раствора монокромата натрия является основополагающим, т.к. из данного

раствора производятся конечные хромосодержащие продукты, такие как окись хрома, бихромат натрия, ангидрид хромовой кислоты, пигменты и т.д.

Начало производства монокромата натрия осуществляется предприятием с момента его образования в 1963 г. Начиная с этого времени производственный коллектив предприятия постоянно проводит работу по совершенствованию технологии производства монокромата натрия. Во времена СССР данная работа проводилась совместно со специализированным институтом УНИХИМом, в настоящее время, к сожалению, коллектив предприятия в одиночку проводит существенные исследовательские и модернизационные работы.

Традиционно технология производства монокромата натрия предусматривает использование доломита в составе шихты, который оказывает двойное действие:

- химическое: связывает кислотные оксиды хромовой руды окисью кальция;
- физическое: образует инертный скелет, тем самым предотвращая сплавление и обеспечивая газопроницаемость прокаливаемой массы.

Производство монокромата натрия схематично изображено ниже.

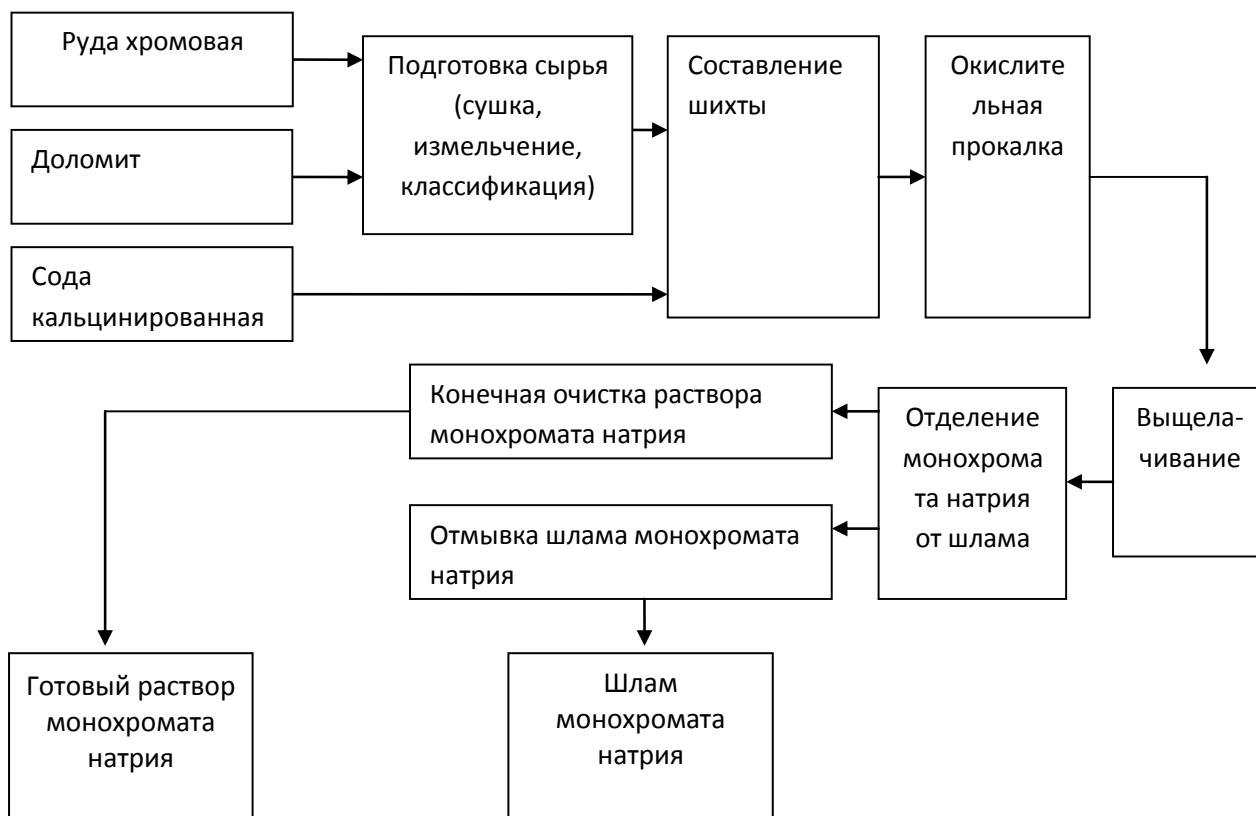


Схема производства монокромата натрия

В 2014 г. предприятием осуществлен переход на бездоломитную технологию получения монокромата натрия, которая подразумевает отказ от инертного наполнителя за счет повторного использования нерудного остатка. За основу реализованной технологии взяты разработки [8], усовершенствованные специалистами завода.

Данная технология, по сравнению с консервативной, является технологией нового уровня, значительно превосходит ее в таких показателях, как энергоэффективность, экологичность, себестоимость при получении продукции. Также технология, разработанная инженерно-техническими специалистами ОАО «НЗХС», позволяет работать на хромосодержащем сырье практически всех мировых производителей, включая низкохромистые руды и концентраты. Так, начиная с 2014 г. для обеспечения потребности предприятия на постоянной основе осуществляются поставки хромовой руды южноафриканского месторождения наряду с прежними поставщиками.

Переход на новую технологию при производстве монокромата натрия позволил снизить себестоимость продукции по следующим причинам:

- отсутствие необходимости приобретения доломита и известняка (для нужд производства в год приобреталось до 160 тыс. т данного сырья);
- снижение энергозатрат и технических затрат на обслуживание оборудования при сушке и измельчении доломита (табл. 1);
- снижение потерь хрома с отходом производства – шламом монокромата натрия, ввиду лучшей степени извлечения хрома из руды при использовании данной технологии, а следовательно, и снижение нормы расхода хромовой руды на производство (табл. 2).

- снижение платы за негативное воздействие за размещение отхода – шлама монокромата.

Таблица 1
Динамика энергозатрат в производстве монокромата

Период		Объем производства монокромата натрия, т	Удельное потребление природного газа, Гкал / на 1 т монокромата натрия
2014 г.	1 квартал	12 121	5 525,74
	2 квартал	12 767	6 237,94
	3 квартал	14 913	5 471,49
	4 квартал	16 521	5 259,41
	Всего	56 322	5 594,69
2015 г.	1 квартал	16 044	5 342,36

Таким образом, в результате внедрения бездоломитной технологии удалось снизить удельное потребление природного газа на 252,33 Гкал/т, что составило 4,5% по сравнению с 2014 годом. Расчет на годовую мощность показывает экономию свыше 13,87 млн Гкал/год.

Таблица 2
Динамика потерь хрома с отходами производства

Период	Используемое сырье	Образование шлама, т	Содержание хрома валового в шламе, %	Потери хрома в шламе, т
2014 г.				
1 квартал	Доломит, хромовая руда	17 158,3	4,9	840,8
	Хромовая руда	8 333,8	6,55	545,9
	Всего за 1 квартал	25 492,1		1 386,7
2 квартал	Доломит, хромовая руда	8 708	4,9	426,7
	Хромовая руда	10 155,2	6,25–6,55	659,6
	Всего за 2 квартал	18 863,2		1 086,3
3 квартал	Доломит, хромовая руда	25 853,7	4,9	1 266,8
	Хромовая руда	3 060,9	6,25–6,55	192,4
	Всего за 3 квартал	28 914,6		1 459,2
4 квартал	Доломит, хромовая руда	11 350,0	4,9	556,2
	Хромовая донская руда	11 542,8	6,25–6,55	751,1
	Всего за 4 квартал	22 892,8		1 307,3
	ИТОГО за 2014 г.	96 162,7		5 239,5
2015 г. 1 квартал	Хромовая руда	14 994,0	6,5	979,2648

Бездоломитная технология повлияла на существенное снижение образования токсичного шлама и потерь хрома в отходах производства. Так, по сравнению с 2014 годом образование шлама сократилось в среднем на 9046 т/квартал (на 37,6%). Потери хрома уменьшились на 330,6 т/квартал (на 25,2%).

Наряду с явной экономической выгодой от перехода на бездоломитную технологию нельзя недооценивать экологический эффект мероприятия.

Основным положительным моментом отказа от применения доломита является снижение нормы выхода шлама с 2,5 до 1,1 т на тонну монокромата, а значит, и снижение объемов размещения отходов в шламонакопителе. Таким образом, снижается негативное воздействие на территорию г. Новотроцка. Кроме того, использование сухого шлама в производстве монокромата натрия позволяет снизить остаточное содержание хрома в конечном шламе.

Необходимо отметить прекращение выбросов загрязняющих веществ от переделов производства, ранее ориентированных на применение

доломита, – разгрузка и хранение сырья, его дробление и сушка. Вновь введенные источники выбросов (связанные с сушкой промежуточного шлама) оборудованы новейшими газоочистными установками. Сравнительные данные (табл. 3) показывают, что с увеличением объема производства монокромата натрия на 32,4% суммарный объем твердых выбросов снизился на 13,5%.

Таблица 3
Изменения объема выбросов
в процессе производства монокромата натрия

Наименование параметра	Объем производства монокромата натрия, т	Удельный выброс загрязняющих веществ при производстве 1 т продукции, т/т	Твердые загрязняющие вещества, т
1 квартал 2014	12 121	0,0026	31,51
1 квартал 2015	16 044	0,0017	27,27

Выводы

В целом, переход на бездоломитную технологию позволил не только провести реконструкцию действующего производства, но и открыл перспективы дальнейшего развития, такие как более полное извлечение полезных компонентов из шлама и перевод его в готовую продукцию доказывает возможность реализации основных принципов рационального природопользования и перехода к устойчивому развитию на предприятии химической промышленности.

Список литературы

1. Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды Оренбургской области. Экологический мониторинг [Электронный ресурс] / Министерство природных ресурсов, экологии и имущественных отношений Оренбургской области. URL: <http://mpr.orb.ru/ecology/129.html> (дата обращения: 15.06.2015).

2. Справочник аналитика: ПДК воздуха населенных мест [Электронный ресурс]. URL: <http://ecmoptec.ru/pdknasmest> (дата обращения: 15.06.2015).
3. Химия, технология и применение соединений хрома и сульфидных солей (материалы Всесоюзного совещания по перспективам развития производств хромовых соединений и сернистого натрия) / под ред. К.В. Ткачева, В.Р. Sereda; Уральский научно-исследовательский химический институт. Новотроицк, 1975.
4. Мацнева Е.А., Магарил Е.Р. Оценка критериев экологической безопасности для определения уровня устойчивости промышленного предприятия // ЭкиП. 2013, февраль. С. 54–57.
5. Экологическая политика ОАО «Новотроицкий завод хромовых соединений» [Электронный ресурс]. Официальный сайт ОАО «НЗХС». URL: http://nzhs.ru/?page_id=2459 (дата обращения: 15.06.2015).
6. Рябинин В.А. и др. // Труды УНИХИМ. 1967. Вып. XVI.
7. А.с. 2281250 Российская Федерация, МПК C01G37/14. Способ получения монокромата натрия / Пиввуев В.Я. (РФ). Заявл. 02.03.2004; опубл. 10.08.2006.
8. Авербух Т.Д., Павлов П.Г. Технология соединений хрома. Изд. 2-е, испр. Л.: Химия, 1973. 336 с.
9. Пат. 2466097 Российская Федерация, МПК C01G37/14. Способ получения монокромата натрия / Марамыгин В.Л., Измалкин В.И., Граф В.Э., Бородин А.В., Гущенко В.А., Дубинин А.В.; заявитель и патентообладатель Новотроицкий завод хромовых соединений.
10. Васильев А.В., Терещенко Ю.П., Хамидуллова Л.Р. Оценка токсикологических загрязнений биосферы на основе балльно-рейтингового ранжирования // ЭкиП. 2013, февраль. С. 46–48.
11. Салахова Р.К., Семеновичев В.В. Особенности хромирования в электролитах на основе соединений трехвалентного хрома с применением наноразмерных частиц оксида циркония // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 4–3.
12. Оценка экологического состояния Магнитогорского водохранилища и динамика изменения основных показателей его загрязнения / Черчинцев В.Д., Волкова Е.А., Серова А.А., Романова Е.Ю. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 2. С. 63–65.
13. Черчинцев В.Д., Кошкина В.С., Антипова Н.А. Влияние шлаковых отвалов на экосистемы Южного Урала // ЭкиП. 2010, февраль. С. 52–54.
14. Тяжелые металлы в компонентах экосистем промышленных регионов с развитой металлургической промышленностью / Янтурин С.И., Кузина Г.Ш., Боброва О.Б., Черчинцев В.Д. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2015. 127 с.

Материал поступил в редакцию 20.10.15.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-1-124-129

ENVIRONMENTAL ASPECTS OF IMPLEMENTATION OF RESOURCE-SAVING DOLOMITE-FREE TECHNOLOGIES OF SODIUM MONOCHROMATEE PRODUCTION AT NOVOTROITSK PLANT OF CHROMIUM COMPOUNDS

Cherchintsev Vyacheslav Dmitrievich – D.Sc. (Eng.), Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: eco_safe@magtu.ru.

Nefedova Yevgeniya Viktorovna – Ph.D. (Pedagogy), Associate Professor, Novotroitsk branch of the National University of Science and Technology MISiS, Novotroitsk, Russia. E-mail: russkisever@rambler.ru.

Kozlov Alexander Sergeevich – head of production and the technical department of "Novotroitsk plant of chromium compounds" Open Joint Stock Company, Novotroitsk, Russia. E-mail: post@nzhs.ru.

Abstract. This article presents the results of the energy saving and efficient use of resources upon implementation of innovative technologies at the Novotroitsk plant of

chromium compounds (NPCC).

Research hypothesis. A dolomite-free technology is more attractive from economic and environmental perspec-

tives if compared with a conventional technology of sodium monochromate production.

Research objective: to calculate energy consumption, chrome losses and pollution emission dynamics when producing sodium monochromate at NPCC.

Research methods: analysis of statistics.

It was NPCC specialists who have developed a dolomite-free sodium monochromate production technology based on research by T. Averbukh and P. Pavlov. The technology implies refusal of an inert filler by means of reuse of non-metallic residues.

The article demonstrates that a transition to the new technology has made it possible to achieve the following results:

- to reduce the cost of production due to the fact that there was no need to purchase dolomite and limestone (160,000 tonnes of raw materials per year would be purchased for production needs),

- to reduce energy consumption and equipment maintenance costs when drying and grinding dolomite,

- to reduce chrome losses with production wastes - sodium monochromate sludge,

- and, consequently, to decrease the chrome ore consumption rate for production.

Calculations performed in the work showed that the specific consumption of natural gas for the 1st quarter of 2015 decreased by 252.33 Gcal / t. Calculations of the annual capacity showed savings of over 13.87 million Gcal / year. The dolomite-free technology has affected a dramatic reduction in toxic sludge formation (by 9,046 tonnes / quarter - 37.6%) and chrome losses in production wastes (by 330.6 tonnes / quarter - 25.2%).

The environmental effect from the dolomite-free technology implementation has been calculated. The effect lies in the fact that the sludge output rate has reduced from 2.5 to 1.1 tonnes per tonne of monochromate, which means reduction in the volume of waste disposal in a sludge collector. Cessation of pollution emissions from dolomite-oriented production processing stages such as unloading, storage, grinding and drying of raw materials has shown that the total volume of solid emissions decreased by 13.5% with increasing sodium monochromate output by 32.4%.

In general, the transition to the dolomite-free technology proves the feasibility of basic principles of sustainable use and a transition to sustained development in the chemical industry. The results presented in the work show that, if compared to existing technology, the dolomite-free technology greatly excels in such characteristics as energy efficiency, environmental friendliness, cost of production. The technology also supports chromium-containing raw materials of almost all global manufacturers, including low chrome ores and concentrates.

Keywords: Chrome, sodium monochromate, resource-saving technologies, sludge, energy consumption.

References

1. State report on the state and protection of the environment of the Orenburg region / Environmental monitoring [electronic resource]. The Ministry of Natural Resources, Environment and Property Relations of the Orenburg region URL: <http://mpr.orb.ru/ecology/129.html> (access date: 06.15.2015).
2. Analyst guide: MAC in the air of populated areas. Electronic resource. URL: <http://ecmoptec.ru/pdknasmest> (access date: 06.15.2015).
3. Khimiya, tekhnologiya i primeneniye soedineniy khroma i sulfidnykh soley (materialy Vsesoyuznogo soveshchaniya po perspektivam razvitiya proizvodstv khromovykh soedineniy i semistogo natriya) / pod red. K. V. Tkacheva, B. P. Sereda; Ural'skij nauchno-issledovatel'skij khimicheskij institut [Chemistry, technology and the use of chromium compounds and sulfide salts (proceedings of the all-Union meeting on the development prospects of production of chromium compounds and sodium sulfide). Ed. K.V. Tkachev, B.P. Sereda, Ural Scientific Research Institute of Chemistry]. Novotroitsk, May, 1975.
4. Matsneva E.A., Magaril E.R. Evaluation of environmental safety criteria to determine sustainability of an industrial enterprise. EkiP, February, 2013, pp. 54–57.
5. Environmental policy of the Novotroitsk plant of chromium compounds Open Joint Stock Company [electronic resource]. NPCC official website URL: http://nzhs.ru/?page_id=2459 (access date: 06.15.2015).
6. Ryabinin V.A. and colleagues. Trudy UNIKHIM [Transactions of UNIKHIM], iss. XVI, 1967.
7. Pivvuyev V.Ya. Sposob polucheniya monokhromata natriya [Sodium monochromate production]. A.s. 2281250 RF, 2004.
8. Averbukh T.D., Pavlov P.G. Tekhnologiya soedineniy khroma [Technology of chromium compounds]. Leningrad: Chemistry, 1973. 336 p.
9. Maramyguin V.L., Izmailkin V.I., Graf V.E., Borodin A.V., Gushchenko V.A., Dubinin A.V. Sposob polucheniya monokhromata natriya [Sodium monochromate production] Patent 2466097 RF.
10. Vasiliev A.V., Tereshchenko Yu.P., Khamidullova L.R. Evaluation of toxicity biosphere pollutions based on point-rating ranking. EkiP, February, 2013, pp. 46–48.
11. Salakhova R.K., Semionychyev V.V. Specifics of chrome plating in electrolytes based on trivalent chromium compounds using nano-sized zirconium oxide particle. Bulletin of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2012, vol. 14, no. 4–3.
12. Cherchintsev V.D., Volkova E.A., Serova A.A., Romanova E.Yu. Assessment of environmental conditions of the Magnitogorsk water basin and basic contamination indicators dynamics. Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2014, no. 2, pp. 63–65.
13. Cherchintsev V.D., Koshkina V.S., Antipova N.A. Impact of slag dumps on ecosystems of the Southern Urals. EkiP, February, 2010, pp. 52–54.
14. Yanturin S.I., Kuzhina G.S., Bobrova O.B., Cherchintsev V.D. Tyazhelye metally v komponentakh ehkosisistem promyshlennykh regionov s razvitoj metallurgicheskoy promyshlennost'yu [Heavy metals in the ecosystem components of industrial regions with a developed metals industry]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2015. 127 p.

Черчинцев В.Д., Нефедова Е.В., Козлов А.С. Экологические аспекты внедрения ресурсосберегающей бездоломитной технологии производства монокромата натрия на Новотроицком заводе хромовых соединений // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14. №1. С. 124–129. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-1-124-129

Cherchintsev V.D., Nefedova Ye.V., Kozlov A.S. Environmental aspects of implementation of resource-saving dolomite-free technologies of sodium monochromate production at Novotroitsk Plant of Chromium Compounds. Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 1, pp. 124–129. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-1-124-129

ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И РЫНОК ПРОДУКЦИИ

УДК 65.01

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-1-130-136

МОДЕРНИЗАЦИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ НА ОСНОВЕ ЛОГИСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ KANBAN И JUST-IN-TIME

Сабадаш Ф.А.¹, Толмачев О.М.¹, Запускалов Н.М.²¹ Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия² Австралийский институт инженеров, Австралия

Аннотация. Формирование рыночной экономики в России объективно требует совершенно нового подхода к проблемам модернизации машиностроительных предприятий. Достижение конкурентного преимущества современных предприятий возможно при условии эффективного использования маркетинга, инновационных форм и методов системы управления, теорий организации процесса разработки промышленной продукции, её производства и доведения до конечного потребителя. Именно поэтому современная логистика является важнейшим фактором обеспечения процветания современного промышленного инновационного предприятия.

В статье анализируются современные проблемы логистики материальных потоков в производстве ведущих российских предприятий Автопрома. Для управления процессами используются логистические системы KANBAN и Just-in-Time. Приведена концепция модернизации складских хозяйств ОАО «БелЗАН» с оптимизацией материально-производственных связей с ОАО «АВТОВАЗ» и ОАО «КАМАЗ». Разработана программа реконструкции складских центров ОАО «БелЗАН», ОАО «КАМАЗ» и ОАО «АВТОВАЗ» с оценкой окупаемости различных вариантов модернизации. Предложены способы применения различных типов технологий хранения и грузообработки. В статье определены объемы запасов, размещаемых на создаваемых складах ОАО «КАМАЗ» и ОАО «АВТОВАЗ», и подробно рассмотрена структура хранящихся запасов. Наши предложения приняты предприятием, проведен расчет экономической окупаемости. Таким образом, была проведена экономическая оценка вариантов функционирования, рассчитан период возврата инвестиций для ЛЦ ОАО «КАМАЗ» и ЛЦ ОАО «АВТОВАЗ». Перечислены методики внедряемых логистических систем и способы их реализации. Описаны основные проблемы, возникающие при сложившейся системе планирования снабжения производства при организации концепции Just-in-Time.

Меры, предлагаемые авторами статьи по совершенствованию логистических потоков на создаваемых складах анализируемых предприятий, достаточно эффективны и способствуют обеспечению завоевания максимального сегмента рынка продукцией данных предприятий.

Ключевые слова: логистическая система, прогнозирование спроса, IT технологии, KANBAN, система Just-in-Time, гравитационное хранение, полочные стеллажные системы, стандарты KLT, грузообработка.

Введение

В настоящее время в литературе и практике работы автомобилестроительных предприятий существует много методик оценки качества процессов материально-технического снабжения, логистики, как правильно привязанных к конкретным условиям [1–22]. В этой связи при рассмотрении проблем производства появляется необходимость разработки специализированных методик, учитывающих особенности конкретных предприятий [23].

Нами определены условия обеспечения производства в соответствии с логистическими системами KANBAN для ОАО «КАМАЗ» и Just-in-time (JIT) для ОАО «АВТОВАЗ». Данные логистические системы управления материальными

потоками в производстве опираются на потребность, которая создается текущим спросом на готовую продукцию. Реализация готовой продукции, которая «вытягивается» с производства, служит сигналом для начала производственного процесса, в котором создается потребность сырья, материалов и комплектующих на каждом участке вплоть до поставщиков сырья, материалов, комплектующих. Чтобы обеспечить бесперебойность такого «вытягивающего» процесса, организация логистической системы требует высокого качества продукции на каждой стадии процесса, жесткого исполнения поставщиком сроков поставки и корректного прогнозирования спроса на готовую продукцию. Каждая из «вытягивающих» производственных логистических систем имеет свои особенности, описанные ниже.

Методики внедряемых логистических систем и их реализация

Система KANBAN была разработана и впервые в мире реализована фирмой «Toyota» [24]. В 1959 году эта фирма начала эксперименты с системой KANBAN и в 1962 году запустила процесс перевода всего производства на этот принцип. В основе организации производства фирмы «Toyota» лежит годовой план производства и сбыта автомобилей, на базе которого составляются месячные и оперативные планы среднесуточного выпуска на каждом участке, основанные на прогнозировании покупательского спроса (период упреждения – 1 и 3 месяца). Суточные графики производства составляются только для главного сборочного конвейера. Для цехов и участков, обслуживающих главный конвейер, графики производства не составляются (им устанавливаются лишь ориентировочные месячные объемы производства).

Постоянное использование философии «точно в срок» позволяет раскрыть необнаруженные дефекты. Так как запасы продукции и деталей могут скрывать проблемы на производстве, то при их уменьшении ежедневный контроль выявит, к примеру, неисправности или простои [25].

Для регулирования в системе KANBAN используют сигнальные устройства (карточки и пр.). При безбумажной технологии в виде сигнальных устройств вместо карточек используются контейнеры (KLT тара). Карточки или контейнеры составляют суть системы KANBAN. Разрешение производить или поставлять дополнительные комплектующие исходит из последующих операций. Карточка является разрешением на получение или производство следующей партии комплектующих [24].

Вместо карточек можно использовать контейнер в качестве сигнального устройства. В этом случае появление пустого контейнера на производственном участке визуально сигнализирует о необходимости его заполнения. Количество материальных запасов регулируется простым добавлением или удалением контейнеров.

Другим вариантом организации сигнализации является маркировка на полу, выполненная в виде контура тары. Пустое место, обозначенное контуром, сигнализирует о необходимости пополнения. Также возможна установка стеллажей у производственного участка, где каждое место выступает в виде сигнального устройства и его освобождение служит сигналом для его пополнения.

Возможны другие способы сигнализации, в том числе основанные на IT технологиях.

Система KANBAN не должна приводить к нулевым материальным запасам на производ-

ственном участке и обеспечивает контроль количества материалов, которое должно находиться в производственном процессе в данный момент времени.

Последовательность внедрения системы KANBAN представлена ниже:

- анализ данных о среднемесечном потреблении каждого управляемого по системе KANBAN изделия;
- определение объема контейнеров (объем материалов необходимый для одного производственного шага) по следующей формуле: средний расход за время пополнения, умноженный на страховой фактор (10–30%);
- изменение логического и физического расположения мест складирования деталей по рабочим участкам;
- разработка системы сигналов по принципам, описанным выше.

При функционировании системы JIT ничего не производится и запас на производственном участке не пополняется пока конечный продукт не будет реализован или отгружен. Когда конечный продукт «вытянут», для восполнения изъятого «вытягиваются» изделия из предыдущей стадии производства или от поставщиков. Таким образом, система Just-in-Time предполагает обеспечение производственного участка всем ассортиментом материалов и комплектующих, необходимых для сборки (изготовления) такого количества производимых изделий на данном участке, которое его покинуло.

Таким образом, отправной точкой для пополнения запаса на производственном участке при реализации системы KANBAN является сигнал, выдаваемый в виде карточки или пустого контейнера по мере его окончания, но при этом на производственном участке есть полностью заполненный контейнер в объеме запаса, достаточного для работы на период пополнения + 10 – 30% (страховой запас). В системе Just-in-Time отправной точкой служит отгрузка готового изделия с производственного участка, после которой осуществляется пополнение запаса в объеме, необходимом для производства следующего аналогичного изделия.

Точно в срок (Точно вовремя, TBC, Just In Time, JIT) – наиболее распространенная в мире логистическая концепция. Основная идея концепции заключается в следующем: если производственное расписание задано, то можно так организовать движение материальных потоков, что все материалы, компоненты и полуфабрикаты будут поступать в необходимом количестве, в нужное место и точно к назначенному сроку для

производства, сборки или реализации готовой продукции. При этом страховые запасы, замораживающие денежные средства фирмы, не нужны. Является также одним из основных принципов **бережливого производства**.

Широкое распространение системы «Точно в срок» началось с конца 50-х годов XX в., когда японская компания Toyota Motors, а потом и другие автомобильные компании Японии начали внедрять систему KANBAN. В настоящее время система «Точно в срок» широко используется в Японии, США и Европе [26].

В настоящее время система снабжения производства в ОАО «АВТОВАЗ» характеризуется большой неравномерностью (коэффициент 21,5). Это обусловлено созданием запасов на территории потребителя, достаточных на месячный план производства, что является недопустимым при внедрении концепции Just-in-Time.

Поэтому при организации склада на территории ОАО «АВТОВАЗ», который призван равномерно обеспечивать потребности производства по системе Just-in-Time, должно происходить снижение уровня содержащегося запаса и площади хранения. Однако при сложившейся системе планирования снабжение производства при организации концепции Just-in-Time не может быть организовано первоначально в том виде, как описано выше. Этому также препятствует отсутствие исходной информации по потребности в комплектующих в зависимости от выпускаемой продукции в количестве, необходимом для ее сборки, и отсутствие планирования на текущую или следующую рабочую смену. В связи с этим внедрение концепции Just-in-Time по обеспечению потребителей комплектующими со склада, организованном на территории ОАО «АВТОВАЗ», может быть реализовано в три этапа.

Этап I. Отгрузка со склада комплектующих потребителям производится в рамках укрупненной единицы (KLT), которой может быть доставлено на различный период производства отдельными потребителями. Пополнение запаса на производстве происходит по мере его завершения.

Этап II. После накопления данных о реальной интенсивности расходования комплектующих потребителями пополнение запасов на производственных участках осуществляется в количестве, равном среднесменным показателям потребления. Данное условие приводит к необходимости комплектования заказов на складе с расфасовкой целого KLT на несколько и отправке к потребителю с последующим ежесменным пополнением запасов.

Этап III. После сбора статистики и формиро-

вания стандартов машинокомплектов, изменения системы планирования производства ОАО «АВТОВАЗ» комплектование заказов на складе осуществляется по машинокомплектам в зависимости от потребителей в многооборотную многосекционную тару, которая доставляется потребителям в количестве машинокомплектов, необходимом на одну рабочую смену или под временной интервал (несколько часов).

Для обеспечения производства ОАО «КАМАЗ» по системе KANBAN и ОАО «АВТОВАЗ» по системе Just-in-Time при поставках продукции в KLT таре для снижения уровней запасов на складах, находящихся на указанных производствах, предлагается использование стратегии управления запасами «Min Max». Функционирование данной системы заключается в определении максимально желательного уровня запаса по каждой товарной позиции на каждом из складов по критерию экономической целесообразности с учетом затрат на хранение и доставку при минимальной партии 1 KLT на товарную позицию и среднесменного потребления каждой товарной позиции. При снижении запасов до определенных пороговых значений осуществляется заказ и пополнение продукции до максимально желательного уровня. При этом на складе должен содержаться страховой запас, обеспечивающий бесперебойное снабжение производства в случае задержки плановой поставки.

Исходя из описанной стратегии, определяется структура и объем запасов, размещаемых на создаваемых складах ОАО «КАМАЗ» и ОАО «АВТОВАЗ». Структура хранящихся запасов:

- Максимальный желательный запас: объем продукции, размещаемый на хранение, рассчитанный на основе критерия экономической целесообразности.
- Пороговый запас: объем продукции, при достижении которого осуществляется заявка на пополнение запасов до максимально желательного уровня. Рассчитывается исходя из сроков выполнения заявки на пополнение.
- Страховой запас: объем продукции, обеспечивающий бесперебойное снабжение производства в случае задержки плановой поставки.

К 2020 г. с учетом планируемых темпов роста объема производства на уровне 4,78% объем выпускаемой продукции составит 64486 т, что эквивалентно среднесуточному выпуску продукции на уровне 176,7 т. В связи с имеющейся технологией производства, переналадкой оборудования производственных линий для выпуска различных номенклатур и сложившегося спроса на продукцию уровень запасов в днях

оборота составляет 10–14 дней. Соответственно максимальный единовременно хранимый запас продукции составляет 2438 т, что эквивалентно 1358 м³ продукции в таре.

Планируемый объем поставок крупным потребителям ОАО «КАМАЗ», ОАО «АВТОВАЗ» в стандартизированной KLT-1 таре на уровне 20200 т/год составит 31% от общего объема выпуска продукции. С появлением новых потребителей или при переводе существующих на многооборотную тару данная величина к 2020 г. может составить 50%. Оставшаяся продукция будет поставаться в гофротаре, Big Box или металлическом контейнере. Гофротара подлежит укрупнению до стандарта грузовой единицы 1200×800×760 мм и размещается на хранение в паллетные стеллажи.

При этом около 61,5% объема поставок в ОАО «КАМАЗ», ОАО «АВТОВАЗ» производится целыми монопаллетами сформированными из KLT-1 по описанному стандарту, что составляет 19% от общего объема. С учетом новых потребителей, которым поставки могут осуществляться монопаллетами с многооборотной тарой или Big Box, указанную величину можно увеличить до 25%. Соответственно оставшиеся 25% в многооборотной таре отгружаются в объеме менее одной паллеты и хранятся предпочтительно в технологиях, не требующих укрупнения (гравитационные или полочные стеллажные системы под стандарты KLT).

Общий запас продукции на складе распределяется на запас продукции, поступившей из производства и хранимой до упаковки, и запас упакованной и готовой к реализации продукции. Запас в днях оборота продукции, ожидающей упаковки, составляет от 4 до 6 дней, готовой продукции от 8 до 10 дней.

Таким образом, средний запас готовой продукции, прошедшей упаковку, составляет 9 дней оборота и 873 м³. Средний запас продукции, ожидающей упаковки, составляет 5 дней и 485 м³. С учетом среднего коэффициента неравномерности 1,2 произведен расчет потребных мест хранения.

С учетом описанных предпосылок на складе ОАО «БелЗАН» возможно применение следующих типов технологий хранения и грузообработки:

На входящем потоке с производства – фронтальное стеллажное хранение укрупненных единиц на поддонах или в бункерах.

На складе готовой упакованной продукции:

- Фронтальное стеллажное паллетное хранение и полочное хранение. Тип обработки – механический.

- Фронтальное стеллажное паллетное и полочное хранение. Тип обработки – автоматический.

- Фронтальное стеллажное паллетное хранение, гравитационное хранение (KLT тоннели). Тип обработки – механический и ручной.

- Фронтальное стеллажное паллетное хранение, гравитационное хранение (KLT тоннели). Тип обработки – автоматический.

Потребители продукции ОАО «БелЗАН» располагаются в большей части регионов Российской Федерации и ближнего зарубежья. При этом покупатели характеризуются различными объемами потребления – от 0,000549 до 7654 т за 7 месяцев 2014 г.

При условии, что поставки осуществляются из одного Распределительного центра (на сегодняшний день – г. Белебей) различным потребителям, для снижения транспортной работы и, соответственно, стоимости доставки продукции конечным потребителям необходимо определить оптимальное местоположение нового Распределительного центра (РЦ), при размещении в котором будет достигнута минимальная суммарная транспортная работа [27, 28]. Если принять, что в новый Распределительный центр завоз продукции будет осуществляться крупными партиями (например, ж.-д. вагонами), то данный объем завоза исключается из рассмотрения, т.к. удельные затраты будут минимальными.

Заключение

Наши предложения приняты предприятием, проведен расчет экономической окупаемости (табл. 1–3).

Таблица 1

Расчет периода окупаемости проекта ЛЦ ОАО «КАМАЗ»

Показатели	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.
Инвестиции (руб.)	11727240								
Чистая прибыль (руб.)		2233318	544595	544595	544595	544595	544595	544595	544595
Амортизация (руб.)		2071586	2071586	2071586	2071586	2071586	2071586	2071586	2071586
Чистый доход (руб.)		4304904	2616181	2616181	2616181	2616181	2616181	2616181	2616181
Дисконтируемый множитель	1	0,93	0,86	0,79	0,74	0,68	0,63	0,58	0,54
Чистый доход дисконтируемый (руб.)	-11727240	4003561	2249916	2066783	1935974	1779003	1648194	1517385	1412738
Реальная ценность (руб.)	-11727240	-7723679	-5473764	-3406981	-1471007	307996	1956190	3473575	4886313

Таблица 2

Расчет периода окупаемости проекта ЛЦ ОАО «АВТОВАЗ»

Показатели	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.
Инвестиции (руб.)	12385920								
Чистая прибыль (руб.)		1749195	-34377	544595	544595	544595	544595	544595	544595
Амортизация (руб.)		2185388	2185388	2185388	2185388	2185388	2185388	2185388	2185388
Чистый доход (руб.)		3934583	2151011	2729983	2729983	2729983	2729983	2729983	2729983
Дисконтируемый множитель	1	0,93	0,86	0,79	0,74	0,68	0,63	0,58	0,54
Чистый доход дисконтируемый (руб.)	-12385920	3659162	1849869	2156687	2020187	1856388	1719889	1583390	1474191
Реальная ценность (руб.)	-12385920	-8726758	-6876888	-4720202	-2700014	-843626	876263	2459654	3933844

Таблица 3

Расчет периода окупаемости проекта СК ОАО «БелЗАН»

Показатели	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.
Инвестиции (руб.)	81235200								
Чистая прибыль (руб.)		22786879	11089011	11089011	11089011	11089011	11089011	11089011	11089011
Амортизация (руб.)		12367380	12367380	12367380	12367380	12367380	12367380	12367380	12367380
Чистый доход (руб.)		35154259	23456391	23456391	23456391	23456391	23456391	23456391	23456391
Дисконтируемый множитель	1	0,93	0,86	0,79	0,74	0,68	0,63	0,58	0,54
Чистый доход дисконтируемый (руб.)	-81235200	32693461	20172496	18530549	17357729	15950346	14777526	13604707	12666451
Реальная ценность (руб.)	-81235200	-48541739	-28369243	-9838694	7519035	23469381	38246908	51851614	64518065

Таким образом, экономическая оценка вариантов функционирования ЛЦ ОАО «КАМАЗ» и ОАО «АВТОВАЗ» показывает, что возврат инвестиций для ЛЦ ОАО «КАМАЗ» произойдет в 2020 г. в случае реализации проекта в 2015 г., а для ЛЦ ОАО «АВТОВАЗ» – в 2021 г. Экономическая оценка СК ОАО «БелЗАН» показывает, что предложенный нами вариант технологии окупается в 2019 г.

Список литературы

1. Применение логики антонимов для комплексного анализа качества автомобильного крепежа / Закиров Д.М., Осипов Д.С., Гун И.Г., Сабадаш А.В., Овчинников С.В., Майстренко В.В., Мезин И.Ю. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. № 4. С. 57–62.
2. Гун И.Г., Михайловский И.А., Осипов Д.С. Квалиметрическая оценка и повышение результативности сквозной технологии и системы менеджмента качества производства шаровых пальцев: монография. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2008.
3. Разработка теории квалиметрии метизного производства / Рубин Г.Ш., Чукин М.В., Гун Г.С., Закиров Д.М., Гун И.Г. // Черные металлы. 2012. № 7. С. 15–20.
4. Комплексная оценка эффективности процессов производства шаровых пальцев: монография / Гун И.Г. [и др.]. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2008.
5. Комплексная оценка результативности сквозных технологий производства с использованием логики антонимов на примере шаровых пальцев / Гун И.Г., Михайловский И.А., Осипов Д.С., Сальников В.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2005. № 9. С. 67–71.
6. Создание и развитие теории квалиметрии металлургии / Гун Г.С., Рубин Г.Ш., Чукин М.В., Гун И.Г., Мезин И.Ю., Корчунов А.Г. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2003. № 5. С. 67.
7. Разработка, моделирование и совершенствование процессов производства шаровых шарниров автомобилей / Гун И.Г., Ми-

хайловский И.А., Осипов Д.С., Куцендик В.И., Сальников В.В., Гун Е.И., Смирнов А.В., Смирнов А.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. №1 (45). С. 52–57.

8. Разработка процесса планетарно-поворотной обкатки / Михайловский И.А., Куцендик В.И., Гун Е.И., Гун И.Г., Сальников В.В. // Металлургические процессы и оборудование. 2014. № 1 (35). С. 39–45.
9. Актуальные проблемы квалиметрии метизного производства в период зарождения шестого технологического уклада / Гун Г.С., Чукин М.В., Рубин Г.Ш., Мезин И.Ю., Корчунов А.Г. // Металлург. 2014. № 4. С. 92–95.
10. Перспективы производства высокопрочного крепежа из заготовок из углеродистых сталей с ультрамелкозернистой структурой / Чукин М.В., Полякова М.А., Рубин Г.Ш., Копцева Н.В., Гун Г.С. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2014. № 1. С. 39–44.
11. Исследование физико-механических свойств и структуры высокопрочных многофункциональных сплавов инварного класса нового поколения / Чукин М.В., Голубчик Э.М., Гун Г.С., Копцева Н.В., Ефимова Ю.Ю., Чукин Д.М., Матушкин А.Н. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 1 (45). С. 43–47.
12. Генезис научных исследований в области качества металлопродукции / Гун Г.С., Мезин И.Ю., Рубин Г.Ш., Минаев А.А., Назайбеков А.Б., Дьяч Х. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 1 (45). С. 92–96.
13. Гун Г.С. Инновационные методы и решения в процессах обработки материалов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 4 (48). С. 99–113.
14. Гун Г.С. Инновационные решения в обработке металлов давлением // Качество в обработке материалов. 2014. № 2. С. 5–26.
15. Научно-педагогическая школа Магнитогорского государственного технического университета по управлению качеством продукции и производственных процессов / Гун Г.С., Мезин И.Ю., Корчунов А.Г., Чукин М.В., Гун И.Г., Рубин Г.Ш. // Качество в обработке материалов. 2014. № 1. С. 5–9.
16. Nanodimensional structural part formation in high carbon steel by thermal and deformation processing. Chuikin M.V., Korchunov A.G., Gun G.S., Polyakova M.A., Koptseva N.V. Вестник Магнитогорского

- государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. № 5 (45). С. 33–35.
17. Гун Г.С., Чукин М.В., Рубин Г.Ш. Управление качеством в метизном производстве // *Металлургические процессы и оборудование*. 2013. № 4 (34). С. 106–111.
 18. Управление качеством продукции в технологиях метизного производства / Корчунов А.Г., Чукин М.В., Гун Г.С., Полякова М.А. Москва, 2012.
 19. Особенности реологических свойств конструкционных наносталей / Чукин М.В., Гун Г.С., Барышников М.П., Валиев Р.З., Рааб Г.И. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2008. № 1. С. 24–27.
 20. Стальная проволока / Белалов Х.Н., Клековкин А.А., Клековкина Н.А., Гун Г.С., Корчунов А.Г., Полякова М.А. Магнитогорск, 2011.
 21. Производство стальной проволоки / Клековкина Н.А., Клековкин А.А., Никифоров Б.А., Гун Г.С., Корчунов А.Г., Зюзин В.И., Кулеша В.А., Савельев Е.В., Белалов Х.Н. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2005.
 22. Гун Г.С., Пудов Е.А., Иванова Л.Б. Оптимизация процессов обработки металлов давлением по комплексному критерию качества // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1982. № 8. С. 62.
 23. Дудин М.Н., Лясников Н.В., Толмачев О.М. Программно-целевое управление предприятиями: возможности и перспективы адаптации к условиям переходной экономики // *Вестник Московского государственного областного университета*. Серия: Экономика. 2013. №4. С. 47–54.
 24. <https://en.wikipedia.org/wiki/Kanban>
 25. О'Шонесси Дж. Конкурентный маркетинг: стратегический подход: пер. с англ. СПб.: Питер, 2012. 394 с.
 26. Пейли Н. Успешный бизнес-план. От стратегических целей к плану действий на один год. М.: Эксмо, 2011. 452 с.
 27. Савицкая Г.В. Анализ хозяйственной деятельности предприятия. Минск., 2014. 686 с.
 28. Стратегический менеджмент / под ред. А.Н. Петрова, Д.В. Шопенко, В.С. Катькало. СПб.: Питер, 2013. 495 с.

Материал поступил в редакцию 20.01.16.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-1-130-136

MODERNIZATION OF MACHINE-BUILDING ENTERPRISES ON THE BASIS OF KANBAN AND JUST-IN-TIME LOGISTICS SYSTEMS

Sabadash Filipp Alekseevich – Postgraduate Student, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia. E-mail: sabadashpa@gmail.com.

Tolmachev Oleg Mikhailovich – Ph.D. (Economics), Associate Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia.

Zapuskalov Nikolay – D.Sc., External Advisor, Australia.

Abstract. The formation of a market economy in Russia objectively requires an entirely new approach to the modernization of machine-building enterprises. The competitiveness of modern enterprises can be achieved if marketing, innovative management system forms and techniques, engineering theories of the industrial product development, manufacturing and end-user distribution are effectively implemented and applied. That is why modern logistics is a crucial factor that facilitates the prosperity of a modern industrial innovation enterprise.

This article analyzes the current issues of material process flow at leading Russian automobile industry enterprises. KANBAN and Just-In-Time logistics systems are used to control processes. The article presents the concept of the modernization of storage facilities of "BelZAN" Open Joint Stock Company with the enhancement of material and production relations with "AVTOVAZ" Open Joint Stock Company and "KAMAZ" Open Joint Stock Company. A program for the reconstruction of storage centers of "BelZAN" Open Joint Stock Company, "KAMAZ" Open Joint Stock Company and "AVTOVAZ" Open Joint Stock Company has been developed with a payback estimate of different modernization options. Application methods of different types of storage and cargo handling technologies have been proposed. The article defines the volume of stocks to be placed in new warehouses of "KAMAZ" Open Joint Stock Company and "AVTOVAZ" Open Joint Stock Company and describes in detail the structure of the stock stored. Our proposals have

been accepted by the enterprise; the economic payback has been calculated. Thus, the economic evaluation of operation options has been carried out; the ROI period has been calculated for the "KAMAZ" and "AvtoVAZ" logistics centers. Techniques of logistics systems under implementation and methods for their implementation have been specified. The authors describe the main challenges arising from the current system of production supply planning in the framework of the Just-in-Time concept management.

The measures to improve logistics flows at new warehouses of the companies under consideration proposed by the authors appear to be effective and make it possible for the products of these companies to capture a higher market share.

Keywords: Logistics system, demand forecasting, IT technologies, KANBAN, Just-in-Time system, gravity storage, shelf rack systems, KLT standards, cargo handling.

References

1. Zakirov D.M., Osipov D.S., Gun I.G., Sabadash A.V., Ovchinnikov S.V., Maistrenko V.V., Mezin I.Yu. Logic of antonyms in the integrated analysis of automobile fastener quality. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2012, no. 4, pp. 57–62.
2. Gun I.G., Mikhailovsky I.A., Osipov D.S. *Kvalimetriceskaya otsenka i povyshenie rezul'tativnosti skvoznoj tekhnologii i sistemy menedzhmenta kachestva proizvodstva sharovykh pal'tsev: monografiya* [Qualimetric evaluation and improvement of the effectiveness of the cross-cutting technology and quality management system of ball pin production: monograph]. Magni-

- togorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2008.
3. Rubin G.Sh., Chukin M.V., Gun G.S., Zakirov D.M., Gun I.G. Development of the metalware production qualimetry theory. *Chemye metally* [Ferrous Metals]. 2012, no. 7, pp. 15–20.
4. Gun I.G. [et al.]. *Kompleksnaya otsenka ehffektivnosti protsessov proizvodstva sharovykh pal'tsev: monografiya* [Comprehensive evaluation of the ball pin production efficiency: monograph]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2008.
5. Gun I.G., Mikhailovsky I.A., Osipov D.S., Salnikov V.V. Comprehensive evaluation of the effectiveness of cross-cutting production technologies using the logic of antonyms: a study of ball pin production. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2005, no. 9, pp. 67–71.
6. Gun G.S., Rubin G.Sh., Chukin M.V., Gun I.G., Mezin I.U., Korchunov A.G. Metallurgy qualimetry theory design and development. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2003, no. 5, p. 67.
7. Gun I.G., Mikhailovsky I.A., Osipov D.S., Kutsependik V.I., Salnikov V.V., Gun E.I., Smirnov A.V., Smirnov A.V. Design, modeling, and improvement of automobile ball joint production processes. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2014, no.1 (45), pp. 52–57.
8. Mikhailovsky I.A., Kutsependik V.I., Gun E.I., Gun I.G., Salnikov V.V. Planetary-rotary rolling process design. *Metallurgicheskie protsessy i oborudovanie* [Metallurgical Processes and Equipment]. 2014, no. 1 (35), pp. 39–45.
9. Gun G.S., Chukin M.V., Rubin G.Sh., Mezin I.Yu., Korchunov A.G. Current issues of metalware production qualimetry during the rise of the sixth technological wave. *Metallurg* [Metallurgist], 2014, no. 4, pp. 92–95.
10. Chukin M.V., Polyakova M.A., Rubin G.Sh., Koptseva N.V., Gun G.S. Prospects of high-strength fastener production from carbon steels with the ultra-fine grain structure. *Kuznechno-shtampovoye proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem* [Die Forging Production. Metal Forming]. 2014, no. 1, pp. 39–44.
11. Chukin M.V., Golubchik E.M., Gun G.S., Koptseva N.V., Yefimova Yu.Yu., Chukin D.M., Matushkin A.N. Study of physical and mechanical properties and the structure of high-strength new-generation general-purpose invar alloys. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2014, no. 1 (45), pp. 43–47.
12. Gun G.S., Mezin I.Yu., Rubin G.Sh., Minaev A.A., Nazaibekov A.E., Dyja H. Research genesis in the field of steel products quality. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2014, no. 1 (45), pp. 92–96.
13. Gun G.S. Innovative methods and solutions in materials processing. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2014, no. 4 (48), pp. 99–113.
14. Gun G.S. Innovative solutions in metal forming. *Kachestvo v obrabotke materialov* [Quality in materials processing]. 2014, no. 2, pp. 5–26.
15. Gun G.S., Mezin I.Yu., Korchunov A.G., Chukin M.V., Gun I.G., Rubin G.Sh. Educational research school of Nosov Magnitogorsk State Technical University in product and industrial process quality management. *Kachestvo v obrabotke materialov* [Quality in materials processing], 2014, no. 1, pp. 5–9.
16. Chukin M.V., Korchunov A.G., Gun G.S., Polyakova M.A., Koptseva N.V. Nanodimensional structural part formation in high carbon steel by thermal and deformation processing. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2013, no. 5 (45), pp. 33–35.
17. Gun G.S., Chukin M.V., Rubin G.Sh. Metalware production quality management. *Metallurgicheskie protsessy i oborudovanie* [Metallurgical Processes and Equipment]. 2013, no. 4 (34), pp. 106–111.
18. Korchunov A.G., Chukin M.V., Gun G.S., Polyakova M.A. *Upravlenie kachestvom produktsii v tekhnologiyakh metiznogo proizvodstva* [Product Quality Management in Metalware Production Technologies]. Moscow, 2012.
19. Chukin M.V., Gun G.S., Baryshnikov M.P., Valiev R.Z., Raab G.I. Peculiarities of rheological properties of constructional nanosteels. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2008, no. 1, pp. 24–27.
20. Belalov Kh.N., Klekovkin A.A., Klekovkina N.A., Gun G.S., Korchunov A.G., Polyakova M.A. *Stal'naya provoloka* [Steel Wire]. Magnitogorsk, 2011.
21. Klekovkina N.A., Klekovkin A.A., Nikiforov B.A., Gun G.S., Korchunov A.G., Zyuzin V.I., Kulesha V.A., Saveliev E.V., Belalov Kh.N. *Proizvodstvo stal'noj provoloki* [Steel Wire Production]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2005.
22. Gun G.S., Pudov E.A., Ivanova L.B. Optimization of Metal Forming Processes with an Integrated Quality Criterion. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [Bulletin of Higher Educational Institutions. Ferrous Metallurgy]. 1982, no. 8, p. 62.
23. Dudin M.N., Liasnikov N.V., Tolmachev O.M. Corporate Management by Objectives: Potentials and Prospects of Adaptation to the Economy in Transition. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Ekhnika* [Vestnik of Moscow Region State University. Economics series]. 2013, no. 4, pp. 47–54.
24. Kanban. Available at <https://en.wikipedia.org/wiki/Kanban> (no access date).
25. J. O'Shaughnessy. *Competitive Marketing: A Strategic Approach*. Transl. from Eng. S.Peterburg: Piter, 2012. 394 p.
26. Peillin N. *Successful Business Plan. From Strategic Goals to a One-Year Action Plan*. Moscow: Eksmo, 2011. 452 p.
27. Savitskaya G.V. *Analysis of Economic Activities of an Enterprise*. Minsk, 2014. 686 p.
28. Petrov A.N., Shopenko D.V., Katkalo V.S. (Ed.) *Strategicheskij menedzhment* [Strategic Management]. S.Peterburg: Piter, 2013. 495 p.

Сабадаш Ф.А., Толмачев О.М., Запужалов Н.М. Модернизация машиностроительных предприятий на основе логистических систем KAN-BAN и Just-in-Time // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14. №1. С. 130–136. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-1-130-136

Sabadash F.A., Tolmachev O.M., Zapuskalov N. Modernization of machine-building enterprises on the basis of KANBAN and Just-in-Time logistics systems. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 1, pp. 130–136. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-1-130-136

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Аксенова Крестина Владимировна – аспирант кафедры физики им. проф. В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.

Астрашабов Игорь Олегович – аспирант кафедры «Обработка металлов давлением», Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия. Тел.: (391)2063731. E-mail: iastrashabov@mail.ru.

Атрошенко Светлана Алексеевна – д-р физ.-мат. наук, проф., ведущий научный сотрудник, Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: satroshe@mail.ru.

Бакшинов Вадим Алексеевич – начальник отдела, ОАО «ММК-Метиз», Магнитогорск, Россия.

Бирюков Александр Викторович – ведущий специалист ОАО «ММК-Метиз», Магнитогорск, Россия.

Бирюков Максим Александрович – инженер-технолог ОАО «ММК», Магнитогорск, Россия. E-mail: bigmax174@gmail.com.

Богатов Александр Александрович – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой обработки металлов давлением, ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия. E-mail: omd@urfu.ru.

Брунелли Катя – Департамент индустриальной инженерии Университета г. Падуя, Италия.

Брусски Стефания – Департамент индустриальной инженерии Университета г. Падуя, Италия.

Бухарицин Валентин Олегович – старший научный сотрудник, ХМИ им. Ж. Абишева, Караганда, Казахстан.

Варламова Ирина Александровна – канд. пед. наук, доц. кафедры химии, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

Ганин Дмитрий Рудольфович – инженер Новотроицкого филиала ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет МИСиС», Новотроицк, Россия. Тел.: +7(3537)67-96-07. E-mail: dmrgan@mail.ru.

Гирева Ханифа Яншаевна – канд. техн. наук, доц. кафедры химии, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

Голубчик Эдуард Михайлович – д-р техн. наук, доц. кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный техни-

ческий университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: golub66@mail.ru.

Горохов Юрий Васильевич – д-р техн. наук, проф. кафедры «Обработка металлов давлением», Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия. Тел.: (391)2063731. E-mail: 160949@list.ru.

Громов Виктор Евгеньевич – д-р физ.-мат. наук, проф., зав. кафедрой физики им. проф. В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия. E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru.

Губанов Иван Юрьевич – канд. техн. наук, ст. преп. кафедры «Обработка металлов давлением», Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия. Тел.: (391)2063731. E-mail: vakal_@mail.ru.

Гун Геннадий Семенович – д-р техн. наук, проф., советник ректора, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: mgту@magtu.ru.

Дабала Мануэле – Департамент индустриальной инженерии Университета г. Падуя, Италия.

Джотти Андреа – Департамент индустриальной инженерии Университета г. Падуя, Италия.

Дружков Виталий Гаврилович – канд. техн. наук, доц. кафедры металлургии черных металлов, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: +7(3519)298430.

Дыя Хенрик – д-р техн. наук, проф. Факультета инженерии производства и технологии материалов, Ченстоховский Технологический Университет, Польша. E-mail: dyja@wip.pcz.pl.

Запускалов Николай – д-р, генеральный директор SIDCO Consulting Ltd, независимый консультант, Австралийский институт инженеров, Австралия. E-mail: zapuskalov@inbox.ru.

Иванов Юрий Федорович – д-р физ.-мат. наук, проф., гл. науч. сотрудник Института сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия. E-mail: yufi55@mail.ru.

Кайралапов Ерлан Токпаевич – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, ТОО «Иновация», Караганда, Казахстан. E-mail: kairalapov.e@mail.ru.

Калугина Наталья Леонидовна – канд. пед. наук, доц. кафедры химии, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

Каримова Люция Монировна – канд. хим. наук, ведущий научный сотрудник, ТОО «Инновация», Караганда, Казахстан. E-mail: lutsia.08@mail.ru.

Картунов Андрей Дмитриевич – главный инженер, ОАО «ММК-Метиз», Магнитогорск, Россия.

Киричков Анатолий Александрович – канд. техн. наук, советник управляющего директора ЕВРАЗ НТМК по научно-техническому развитию, Нижний Тагил, Россия. Тел.: (73435) 49-05-43. E-mail: anatoly.kirichkov@evraz.com.

Клеменкова Диана Владимировна – магистрант кафедры «Обработка металлов давлением», Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия. Тел.: (391)2063731. E-mail: 89080139419@yandex.ru.

Козлов Александр Сергеевич – начальник производственно-технического отдела ОАО «Новотроицкий завод хромовых соединений», Новотроицк, Россия. E-mail: post@nzh.ru.

Константинов Игорь Лазаревич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Обработка металлов давлением», Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия. Тел.: (391)2063731. E-mail: ilcon@mail.ru.

Космацкий Ярослав Игоревич – канд. техн. наук, зам. начальника отдела по материалам, ОАО «РосНИТИ», Челябинск, Россия. Тел./факс.: +7 (351) 734-70-60. E-mail: kosmatski@rosniti.ru.

Кубак Денис Анатольевич – канд. техн. наук, младший научный сотрудник ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

Кузнецова Алла Сергеевна – ассистент кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: allakuznetsova.mgtu@mail.ru.

Кушнарев Алексей Владиславович – д-р техн. наук, управляющий директор ОАО «ЕВРАЗ НТМК», Нижний Тагил, Россия. Тел.: (73435) 49-72-70. E-mail: director@ntmk.ru.

Ленчина Родриго – Департамент индустриальной инженерии Университета г. Падуа, Италия.

Лобанов Игорь Евгеньевич – д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник ПНИЛ-204, Московский авиационный институт (государственный технический университет), Москва, Россия. E-mail: loobbaannooff@live.ru.

Матиас Пихлер - президент Wirtgen International GmbH, Виндхаген, Германия. E-mail: mathias.pichler@wirtgen.de.

Медяник Надежда Леонидовна – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой химии ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет

им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: 8(3519)29-85-22. E-mail: chem@mgtu.ru.

Нефедова Евгения Викторовна – канд. пед. наук, доц. кафедры математики и естествознания, Новотроицкий филиал НИТУ «МИСиС», Новотроицк, Россия. E-mail: russkisever@rambler.ru.

Никитина Елена Николаевна – инженер-исследователь кафедры физики им. проф. В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.

Панычев Анатолий Алексеевич – канд. техн. наук, главный специалист по природным ресурсам АО «Уральская Сталь», Новотроицк, Россия. Тел.: +7(3537)66-28-09. E-mail: a.panychev@uralsteel.com.

Песин Александр Моисеевич – д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: pesin@bk.ru.

Петухов Василий Николаевич – д-р техн. наук, проф. кафедры физической химии и химической технологии, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: chief. Petuhov 2013@ yandex.ru.

Пискажова Татьяна Валериевна – д-р техн. наук, зав. кафедрой «Автоматизация технологических процессов и теплотехники в металлургии», Институт цветных металлов и материаловедения, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия. E-mail: piskazhova@ya.ru.

Портянкин Артем Александрович – аспирант кафедры «Автоматизация производственных процессов и теплотехника в металлургии», Институт цветных металлов и материаловедения, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия. E-mail: aaportyankin@gmail.com.

Пузырев Сергей Сергеевич – аспирант кафедры обработки металлов давлением, ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия. E-mail: siga@inbox.ru.

Рубин Геннадий Шмульевич – канд. техн. наук, доц. кафедры технологии, сертификации и сервиса автомобилей, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: rubingsh@gmail.com.

Сабадаш Филипп Алексеевич – аспирант кафедры ИБМ-3 «Промышленная логистика» Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия. E-mail: sabadashpa@gmail.com.

Семина Ольга Алексеевна – канд. пед. наук, доц. кафедры иностранных языков, Сибирский

государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.

Сидельников Сергей Борисович – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Обработка металлов давлением», Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия. Тел.: (391)2063731. E-mail: sbs270359@yandex.ru.

Соколовский Александр Валентинович - д-р техн. наук, председатель совета директоров ООО «НТЦ-Геотехнология», Челябинск, Россия. E-mail: avs@ustup.ru.

Соложенкин Петр Михайлович – д-р техн. наук, проф., главный научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр Российской академии наук (ИПКОН РАН), Москва, Россия. E-mail: solozhenkin@mail.ru.

Тинькова Светлана Михайловна – канд. техн. наук, доц. кафедры «Автоматизация производственных процессов и теплотехника в металлургии», Институт цветных металлов и материаловедения, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.

Толмачев Олег Михайлович – канд. экон. наук, доц. кафедры ИБМ-3 «Промышленная логистика» Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.

Тусупбаев Несипбай Куандыкович – д-р техн. наук, доц., зав. лабораторией флотореагентов и обогащения АО «Центр наук о Земле, металлургии и обогащения», Алматы, Республика Казахстан.

Черчинцев Вячеслав Дмитриевич – д-р техн. наук, проф., Заслуженный работник высшей школы РФ, зав. кафедрой экологии и безопасности жизнедеятельности ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: eco_safe@magtu.ru.

Чукин Михаил Витальевич – д-р техн. наук, проф., первый проректор – проректор по научной и инновационной работе, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

Шаповалов Алексей Николаевич – канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой металлургических технологий и оборудования Новотроицкого филиала ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет МИСиС», Новотроицк, Россия. Тел.: +7(3537)67-96-07. E-mail: alshapo@yandex.ru.

Швабенланд Елена Егоровна - зав. сектором, отдел методических основ оценки проектной документации на разработку месторождений ТПИ, ФГУП «ВИМС», Москва, Россия. E-mail: schwabenland@vims-geo.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 СТАТЕЙ

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.

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 $\eta(t) = I_{\text{нл}}/I_{\text{п0}}$ от времени и удалённости КЗ от выводов асинхронного двигателя

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

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

4. ДОКУМЕНТЫ, ПРИЛАГАЕМЫЕ К СТАТЬЕ

4.1. Экспертное заключение о возможности опубликования.

4.2. Договор.

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

Статьи проходят обязательное научное рецензирование.

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

По вопросам публикации статей обращаться: 455000, 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»).