

ВЕСТНИК

Магнитогорского государственного
технического университета им. Г. И. Носова

№3 (51) сентябрь 2015 г.

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;
Дуб А.В. – советник ген. директора
ОАО НПО «ЦНИИТМАШ»,
д-р техн. наук, Москва, Россия;
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;
Капдунов 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;

Рашиков 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.

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: Сухих О.Е.

© ФГБОУ ВПО «МГТУ», 2015

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 25.09.2015. Заказ 606. Тираж 500 экз. Цена свободная.

VESTNIK

of Nosov Magnitogorsk State Technical University

No. 3 (51) September 2015

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.

Dub A.V. – D.Sc., Adviser General Director
of OJSC Research and Production Association
Central Research Institute for Engineering Technology
(NPO TsNIITMASH), Moscow, Russia.

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.

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.

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: Sukhikh O.E.

© Federal State Budgetary Institution of Higher Professional Education
Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2015

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
Tel.: +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: 25.09.2015. Order 606. Circulation: 500. Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

Разработка полезных ископаемых	5
<i>Першин Г.Д., Караулов Н.Г., Уляков М.С.</i> Современные технологические схемы добычи блочного высокопрочного камня.....	5
<i>Медяник Н.Л., Бодьян Л.А., Варламова И.А., Гиревая Х.Я., Калугина Н.Л., Гиревой Т.А.</i> Изучение сорбционной активности угольной поверхности	11
<i>Соложенкин П.М., Дегодя Е.Ю., Шавакулева О.П.</i> Модифицированные жирные кислоты, их молекулярное моделирование для прогноза флотации руд щелочноземельных элементов	16
<i>Каримова Л.М., Кайраляпов Е.Т.</i> Изучение зависимости самопроизвольного достижения максимальной температуры хлорирующего обжига чернового медносульфидного концентрата	22
Металлургия черных, цветных и редких металлов	28
<i>Сибатагуллин С.К., Харченко А.С.</i> Выявление рациональной последовательности набора компонентов сырья в бункер БЗУ лоткового типа физическим моделированием.....	28
<i>Пожидаетов Ю.А., Столярова М.С., Бабинцев Я.В.</i> Эффективные способы тушения кокса.....	34
Литейное производство	39
<i>Колокольцев В.М., Синицкий Е.В., Савинов А.С.</i> Моделирование температурных полей при получении отливок	39
Обработка металлов давлением	44
<i>Беляев С.В., Богданов Д.В., Губанов И.Ю., Горохов Ю.В., Крохин А.Ю., Фролов В.Ф., Костин И.В.</i> Анализ энергосиловых условий непрерывного прессования методом conform.....	44
<i>Курмачев Ю.Ф.</i> Проектирование и расчет зоны редуцирования калибра станов холодной прокатки труб из алюминиевых сплавов	52
<i>Колмогоров Г.Л., Чернова Т.В., Бурдина Ю.А.</i> Эффективность оптимизации геометрии технологического инструмента для волочения	55
<i>Шемшурова Н.Г., Корнилов В.Л., Антипанов В.Г.</i> Совершенствование калибровок валков профилигибочных станов	58
Технологии обработки материалов	64
<i>Белокопытов В.И.</i> Выбор прессованной заготовки для штамповки поковок из гранул алюминиевых сплавов	64
<i>Герасименко Т.Е., Мешков Е.И., Чибашвили А.В.</i> Математическое моделирование процесса пиролиза при прокатке углеродных материалов	70
<i>Козыр А.В., Кутлубаев И.М., Попова Т.М., Пыталев И.А.</i> Имитационное моделирование процесса движения мелющих тел в барабанной шаровой мельнице	75

CONTENTS

Mineral Mining	5
<i>Pershin G.D., Karaulov N.G., Ulyakov M.S.</i> Modern technological schemes of dimension high- strength stone mining.....	5
<i>Medyanik N.L., Girevaya Kh.Ya., Kalugina N.L., Varlamova I.A., Bodyan Ly.A., Girevoy T.A.</i> Study of the sorption activity of a coal surface	11
<i>Solozhenkin P.M., Degodia E.Yu., Shavakuleva O.P.</i> Modified fatty acids, their molecular modelling for the forecast of flotation of ores of alkaline-earth elements.....	16
<i>Karimova L.M., Kairalapov Y.T.</i> Dependence of spontaneous achievement of maximum chloridizing roasting temperature of rough copper sulphide concentrate.....	22
Metallurgy of Ferrous, Non-Ferrous and Rare Metals	28
<i>Sibagatullin S.K., Kharchenko A.S.</i> Identification of an efficient sequence of charging components of raw materials into the hopper of the bell-less charging device of a chute type by physical modeling	28
<i>Pozhidaev Yu.A., Stolyarova M.S., Babintsev Ya.V.</i> Efficient coke quenching methods.....	34
Foundry	39
<i>Kolokoltsev V.M., Sinitskiy Ye.V., Savinov A.S.</i> Modelling of temperature fields when producing castings.....	39
Metal Forming.....	44
<i>Belyaev S.V., Bogdanov D.V., Gubanov I.Yu., Gorokhov Yu.V., Krokhin A.Yu., Frolov V.F., Kostin I.V.</i> Analysis of power conditions of continuous extrusion by the conform process	44
<i>Kurmachev Yu.F.</i> Design and calculation of a reducing zone of grooves for cold rolling mills for tubes from aluminum alloys	52
<i>Kolmogorov G.L., Chernova T.Vy., Burdina Yu.A.</i> Efficiency of optimization of a drawing tool geometry.....	55
<i>Shemshurova N.G., Kornilov V.L., Antipanov V.G.</i> Improving the roll pass design of roll forming mills	58
Materials Processing Technologies	64
<i>Belokopytov V.I.</i> Selecting blanks for stamping forgings from pellets of aluminum alloys	64
<i>Gerasimenko T.E., Meshkov E.I., Chibashvili A.V.</i> Mathematical simulation of the pyrolysis process during calcination of carbon-base materials	70
<i>Kozyr A.V., Kutlubaev I.M., Popova T.M., Pytalev I.A.</i> Simulation modeling of the process of moving of grinding bodies in a ball mill.....	75

Материаловедение и термическая обработка металлов	78
<i>Смирнов М.А., Пышминцев И.Ю., Лаев К.А., Храмков Е.В., Алютин Д.М.</i> Свойства высокохромистых коррозионностойких сталей, подвергнутых высокотемпературной термомеханической обработке.....	
	78
Надежность и долговечность металлургического производства.....	83
<i>Пузик Е.А., Жиркин Ю.В., Филатов А.А.</i> Повышение долговечности подшипниковых опор прокатных клетей «кварто» при их техническом обслуживании	
	83
Теплоэнергетика металлургической отрасли	89
<i>Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Жадинский Д.Ю., Ахметова А.У.</i> Оптимальные топливосберегающие режимы нагрева непрерывнолитых заготовок в методических печах	
	89
Экология металлургической отрасли.....	97
<i>Черчинцев В.Д., Коротецкая В.А., Зуева Т.Ю.</i> Стратегия и тактика проведения природоохранных мероприятий предприятиями черной металлургии.....	
	97
Управление персоналом	101
<i>Логунова О.С., Егорова Л.Г., Королева В.В.</i> Динамика показателей публикационной активности профессорско-преподавательского состава Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова.....	
	101
Сведения об авторах	113

Materials Science and Heat Treatment of Metals.....	78
<i>Smirnov M.A., Pyshmintsev I.Yu., Laev K.A., Khramkov E.V., Alyutin D.M.</i> Properties of high-chromium corrosion-resistant steels exposed to high-temperature thermomechanical treatment.....	
	78
Reliability and Service Life of Metallurgical Facilities	83
<i>Puzik E.A., Zhirkin Yu.V., Filatov A.A.</i> Increase in the life of bearing supports of four-high stands during their maintenance	
	83
Heat Power Engineering of the Metallurgical Industry	89
<i>Parsunkin B.N., Andreev S.M., Zhadinsky D.Yu., Akhmetova A.U.</i> Optimal fuel-efficient modes of heating continuously cast billets in continuous reheating furnaces	
	89
Ecology of the Metallurgical Industry.....	97
<i>Cherchintsev Vy.D., Korotetskaya V.A., Zueva T.Yu.</i> Strategy and tactics of environmental measures carried out by iron and steel enterprises	
	97
HR Management	101
<i>Logunova O.S., Egorova Ly.G., Koroleva V.V.</i> A trend in indexes of the publication activity of the academic staff at Nosov Magnitogorsk State Technical University.....	
	101
Information about authors	113

РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.352.1:622.22

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ДОБЫЧИ БЛОЧНОГО ВЫСОКОПРОЧНОГО КАМНЯ

Першин Г.Д., Караулов Н.Г., Уляков М.С.

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

Аннотация. В статье приводится анализ технологических схем добычи гранитных блоков в Финляндии, Италии, Португалии, Испании и России. Предложена идея увеличения выхода товарных блоков из породного массива путем минимизации технологических потерь блочной продукции на месторождениях со сложным залеганием природных отдельностей, ограниченных системами круто- и пологопадающих трещин. Разработана методика расчета рациональных технологических параметров комбинированного способа подготовки к выемке блочного высокопрочного камня на месторождениях со сложными горно-геологическими условиями залегания полезного ископаемого на основе высокоуступной двухстадийной схемы отработки массива, когда на первой стадии отделяется монолит с помощью алмазно-канатной машины, а на второй – опрокинутый на рабочую площадку монолит разделяется на товарные блоки с использованием станков строчечного бурения.

Ключевые слова: алмазно-канатная машина, производительность, гранитные блоки, первичный монолит, вторичный монолит, демпферная подсыпка, горизонтальный рез, параметры монолита, высота уступа, трещиноватость массива.

Введение

Добычу гранитных блоков открытым способом осуществляют по трем схемам: одно-, двух- и трехстадийной. Выбор той или иной схемы зависит от размеров содержащихся в массиве природных блоков камня, которые определяются показателями трещиноватости. На практике в большинстве случаев число стадий составляет две или три [1, 2].

Одностадийная схема предусматривает получение готовой продукции после отделения блока от массива (1–10 м³). Этой операцией достигается выемка блоков заданных размеров и формы, близкой к стандартной. В настоящее время такая схема применяется редко. Необходимость двух- и трехстадийной добычи связана с большими размерами добываемых блоков (монолитов) при использовании природной трещиноватости массива. Отделенный от массива монолит в этом случае отличается от требуемых техническими условиями размеров и должен подвергнуться разделке на блоки необходимых размеров и формы.

Технические и технологические разработки

Технология двухстадийной добычи блоков включает два этапа: отделение от массива монолита объемом 80–800 м³ и вторичную разделку.

В случае, когда продольные и поперечные системы трещин близки к вертикальному направле-

нию, а постельно-пластовые трещины имеют горизонтальное или слабонаклонное (угол падения до 5 град) залегание, разделение производится без опрокидывания (рис. 1).

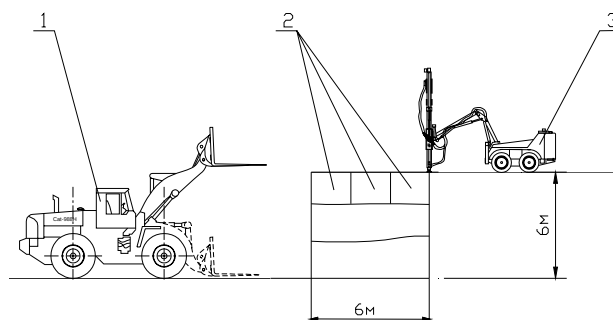


Рис. 1. Схема отделения и разделки монолита на товарные блоки без опрокидывания на Мансуровском месторождении гранита (Россия, республика Башкортостан): 1 – погрузчик, 2 – блоки, 3 – буровая самоходная установка DC 120

Рассмотрим подробнее двухстадийную схему добычи монолитов камня без их опрокидывания на примере месторождение гранита Kuru Grey (рис. 2). Месторождение расположено вблизи города Тампере (Финляндия) и разрабатывается с 1950 года. При годовой производительности по товарным блокам 4500 м³ в год на карьере работают всего три человека: водитель погрузчика,

операторы буровой установки DC120 и ручного пневмоперфоратора. Они же могут выполнять и другие работы. Получается, что на одного горного рабочего приходится 1500 м³ товарных блоков в год, в то время как наиболее высокий показатель на российских гранитных карьерах (Мансуровский, Западно-Султаевский) составляет 200–300 м³ [3, 4].



Рис. 2. Месторождение гранита Kuru Grey (Финляндия, г. Тампере)

Система разработки – углубочно-сплошная, добыча блоков осуществляется горизонтальными и слабонаклонными слоями-уступами. Параметры отделяемого монолита: длина 40–60 м, высота 1–2 м, ширина 1–1,5 м. Отрезная щель создается буровой установкой Sandvik (рекомендуется буровой станок Sandvik DC 700, оснащенный гидроперфоратором HL710, глубина бурения до 29 м, диаметр скважин от 64 до 102 мм). При проходке отрезной щели сначала работают коронками диаметром 89 мм, далее 76 (меньшим диаметром рациональнее добуривать). С помощью самоходной буровой установки DC120 (глубина бурения до 9 м, диаметр шпуров 24–45 мм, оборудована гидроперфоратором HEX1) бурятся шпуров диаметром 24 мм с интервалом 30 см. Месторождение вскрыто двумя внешне-внутренними общими траншеями со спиральной формой трассы без площадок примыкания. Съезды в карьере – как насыпные, так и созданные в гранитном массиве (с использованием природных постельно-пластовых трещин). Для подготовки добычных уступов применяется бурение ручным перфоратором [3].

Погрузчик WA600 (рис. 3) производства фирмы Komatsu с емкостью ковша 6,5 м³ дополнительно укомплектован быстросъемными вилами и кантователем блоков для опрокидывания монолитов на отсыпанные подушки из штыба и буровой мелочи. Отделенные блоки перевозятся погрузчиком на временный склад, расположенный в выработанном пространстве карьера.



Рис. 3. Транспортировка блоков погрузчиком WA600

Технологией также предусматривается взрывное отделение первичного монолита трубками Forsit. Детонация происходит последовательно по частям и поэтому такой способ взрывания практически не влияет на блочность камня.

Пластовое залегание пород группы гранитов с практически горизонтальными слоями дает возможность вести добычу блоков с выходом до 75% и более при невысоких трудозатратах. Однако такое благоприятное для камнедобычи залегание является лишь частным случаем генетической природы трещин в массиве. Более общий случай – трансформация горизонтальных (слабонаклонных) трещин в пологопадающие, а вертикальных поперечных и продольных трещин в крутопадающие, при этом количество крутопадающих систем может быть более двух. Выход блоков на таких месторождениях составляет 10–60%, что и является главной причиной дефицита блочной продукции из высокопрочного облицовочного камня [5–7].

В последние годы в мировой индустрии камня наметилась стабильная тенденция применения алмазно-канатных машин (АКМ) на гранитных карьерах со сложным залеганием в массиве природных трещин. Основанием явился многолетний практический опыт и положительные результаты применения АКМ на мраморных карьерах. Более высокий удельный расход дорогостоящего гибкого алмазного инструмента на породах типа гранит по сравнению с породами средней прочности являлся сдерживающим фактором применения данного камнерезного оборудования при добыче гранитных блоков. Однако по мере совершенствования технологии и техники производства алмазно-канатного инструмента цена его снижалась, а применение на карьерах высокопрочного камня добычного оборудования с гибким режущим инструментом расширялось. Технология ведения добычных работ на гранитных карьерах полностью соответствует мраморным карьерам,

когда на первой стадии от массива отделяется монолит с помощью АКМ, а на второй – опрокинутый на рабочую площадку монолит разделяется на товарные блоки с использованием станков строчечного бурения и механических клиньев (комбинированный способ подготовки блоков камня к выемке) (рис. 4). При этом главной целью двухстадийной технологии также остается обеспечение повышения выхода товарных блоков в условиях сложного залегания природных трещин в массиве за счет обоснованного выбора линейных размеров отделяемого монолита.

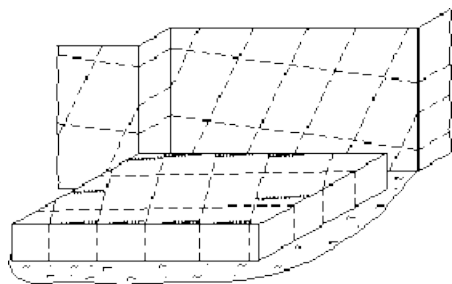


Рис. 4. Схема разделки опрокинутого монолита на товарные блоки шпуровым способом (2-я стадия) на месторождениях со сложными горно-геологическими условиями залегания

Учитывая, что неортогональность крутопадающих плоскостей продольных и поперечных

$$k_{m,n} = \frac{\left[\frac{(n_n \cdot l_n)^2 \cdot \sin \delta_k \cdot \cos \delta_k}{(\sin \gamma)^2} + l_k^2 \cdot n_k \cdot \operatorname{ctg} \delta_k + n_n \cdot n_k \cdot l_k^2 \cdot \operatorname{ctg} \gamma \right]}{(H_m \cdot L_m)}, \quad (4)$$

где n_k и n_n – количество отдельностей систем круто- и пологопадающих трещин массива, шт.; δ_k , δ_n – углы падения круто- и пологопадающих систем трещин, град; γ – угол между круто- и пологопадающими системами трещин, град; l_k и l_n – расстояние между круто- и пологопадающими системами трещин, м; $k_{m,n}$ – коэффициент относительных технологических потерь блочной продукции.

Суммарные относительные технологические потери блочной продукции предложено записать и как функцию высоты уступа (2). В результате выражение (4) примет следующий вид:

$$k_{m,n} = \frac{H_y^2 \cdot \operatorname{ctg} \delta_k + H_y \cdot (l_k^2 / l_n) \cdot n_k \cdot (\cos \gamma / \sin \delta_k) + n_k \cdot l_k^2 \cdot \operatorname{ctg} \delta_k}{H_y \cdot (H_y \cdot \operatorname{ctg} \delta_k + n_k \cdot l_k / \sin \delta_k)}. \quad (5)$$

Нахождение экстремумов технологических потерь по условию

$$\partial k_{m,n} / \partial H_y = 0 \quad (6)$$

дает зависимость для расчета оптимальной (с минимальными технологическими потерями) высоты уступа:

$$H_y^{on} = \frac{l_k \cdot \left[\cos \delta_k + \sqrt{(\cos \delta_k)^2 + n_k \cdot (1 - (l_k / l_n) \cdot \cos \gamma)} \right]}{(1 - (l_k / l_n) \cdot \cos \gamma)}. \quad (7)$$

трещин не превышает 15 град, пассивочные работы шпуровым способом по устранению косоугольности блоков по данным плоскостям не предусматривается. Тогда общий объем шпуровых работ на разделочно-пассивочных операциях (2-я стадия) составит

$$L_{шп} = 2 \cdot n_k \cdot l_k \cdot B / l_{шп}, \quad (1)$$

где n_k – количество отдельностей, заключенных между плоскостями крутопадающих трещин массива, в пределах линейного размера рассматриваемого монолита, шт.; l_k – расстояние между плоскостями в крутопадающих системах трещин, м; B – ширина монолита, м; $l_{шп}$ – расстояние между шпурами, м.

Авторами разработана методика расчета, позволяющая в простом виде получить геометрические уравнения, в параметрическом виде связывающие искомые линейные параметры монолита от горно-геометрических параметров трещиноватости массива:

$$H_y = H_m = n_n \cdot l_n \cdot \sin \delta_k / \sin \gamma; \quad (2)$$

$$L_m = n_k \cdot \frac{l_k}{\sin \delta_k} + n_n \cdot \frac{l_n}{\sin \gamma} \cdot \cos \delta_k; \quad (3)$$

Определение оптимальной высоты уступа позволяет найти из (2) и длину монолита как рациональную величину:

$$L_m = n_k \cdot \frac{l_k}{\sin \delta_k} + H_y^{on} \cdot \operatorname{ctg} \delta_k. \quad (8)$$

Как видим из полученных выражений (7) и (8), каждому целочисленному значению n_k при заданной характеристике трещиноватости массива соответствует оптимальное значение высоты уступа и рациональная величина длины монолита, которым отвечает условие минимальных технологических потерь блочной продукции, то есть условие максимального выхода блоков (рис. 5).

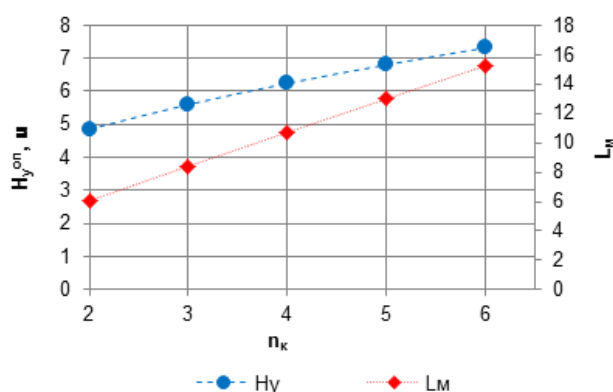


Рис. 5. Зависимость оптимальной высоты уступа и длины монолита от количества в нем крутопадающих отдельностей для Юго-Восточного участка Нижне-Санарского месторождения гранодиорита, Россия, Челябинская область ($\delta_k=68^\circ$, $\gamma=65^\circ$, $l_k=1,9$ м, $l_n=2$ м)

В качестве критерия определения величины n_k принято относительное снижение технологических потерь блочной продукции (рис. 6). По наибольшему значению данного показателя с учетом рациональных размеров рабочей площадки и возможности опрокидывания на нее монолита для горно-геологических условий Юго-Восточного участка Нижне-Санарского месторождения гранодиорита находим $n_k=3$ либо $n_k=4$.

Рациональная ширина монолита (B) находится из условия наибольшего выхода блоков из монолита и возможности его опрокидывания на рабочую площадку. Применительно к горно-геологическим характеристикам трещиноватости Юго-Восточного участка Нижне-Санарского месторождения гранодиорита ($\delta_k=68^\circ$, $\gamma=65^\circ$, $l_k=1,9$ м, $l_n=2$ м) по разработанной методике были рассчитаны рациональные размеры отделяемого монолита: для $n_k=3$ — $H_y^{on}=5,6$ м, $L_m=8,4$ м, $B_m=1,7$ м; для $n_k=4$ — $H_y^{on}=6,2$ м, $L_m=10,7$ м, $B_m=1,7$ м.

На рис. 7 показана разделка опрокинутого

монолита шпуровым способом с применением механических клиньев на гранитном карьере Luboiiu (Италия). При этом отделение монолита по горизонтальной плоскости осуществляется с использованием АКМ (двухстадийная схема с опрокидыванием монолита).

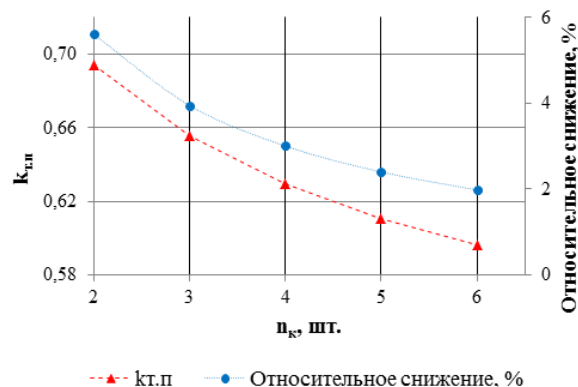


Рис. 6. Зависимость коэффициента относительных технологических потерь блочной продукции ($k_{m,n}$) и относительного снижения его величины (относительное снижение, %) от количества отдельностей крутопадающих систем трещин массива (n_k , шт.)



а



б

Рис. 7. Карьер Luboiiu на о. Сардиния (Италия): а – горизонтальный раз АКМ, б – разделка опрокинутого на демпферную подсыпку монолита

Основное отличие трехстадийной схемы от двухстадийной заключается в отделении от массива большего по объему монолита 300–3000 м³ (рис. 8).

Рассмотрим подробнее трехстадийную схему добычи монолитов камня с их опрокидыванием на примере месторождение гранита Rosa Porrino (рис. 9), которое расположено на северо-западе

Испании вблизи города Поррино. Месторождение нагорного типа, рыхлая вскрыша отсутствует, разрабатывается с 1960 года. В настоящее время численность работающих на карьере составляет 9 человек, 4 из которых командированы заказчиком. При производительности 12000 м³ в год по товарным блокам на одного рабочего приходится 1333 м³.

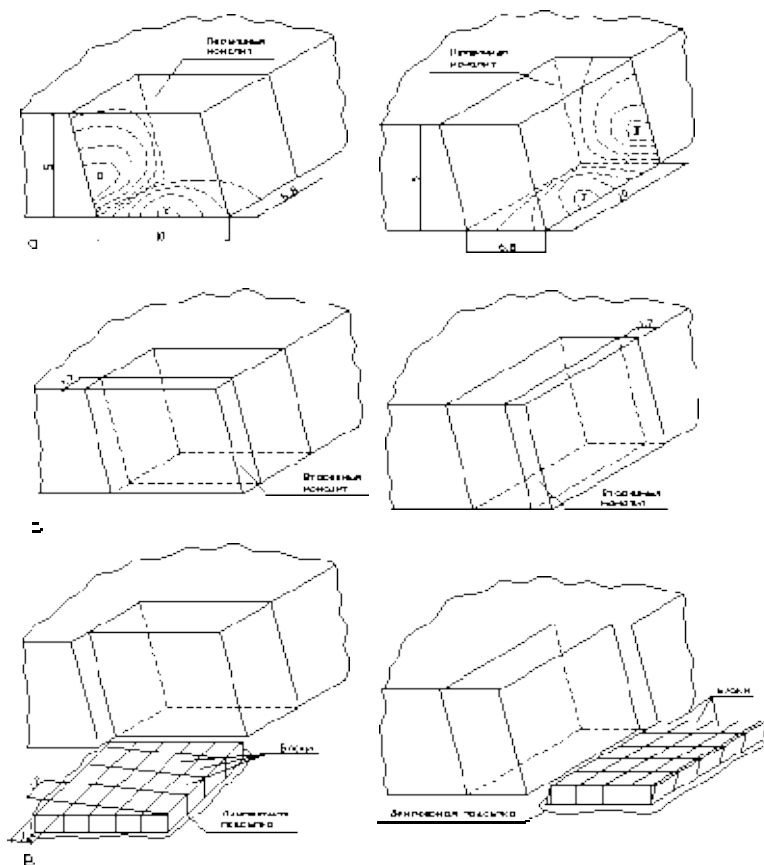


Рис. 8. Трехстадийная схема добычи гранитных блоков с опрокидыванием монолита и разделкой его по направлению параллельно или ортогонально к системе трещин (месторождение гранита Rosa Porrino, Испания): а – отделение первичного монолита (10×6,8×5 м); б – отделение вторичного монолита (10×1,7×5 м); в – завалка вторичного монолита на демпферную подсыпку и разделение его на блоки (1,7×1,2×1,5 м)



Рис. 9. Месторождение гранита Rosa Porrino (Испания)

На карьере применяется высокоуступная трехстадийная технология добычи блоков с использованием АКМ. Пиление осуществляется карьерными машинами CBC75HPN (мощность 55 кВт, диаметр ведущего шкива 810 мм) и CBC-MD75HP (57 кВт, 810 мм) производства испанской фирмы Grani Roc (г. Леон), входящей в состав компании Grupo Hedisa Cor. Максимальная производительность пиления достигает $10 \text{ м}^2/\text{ч}$. Вода для охлаждения каната повторно не используется. Бурение пилотных скважин предусматривается установкой Long hole drilling machine (пневмопривод, диаметр коронки 90 мм, производитель – фирма Grani Roc). Горизонтальная скважина бурится на высоте 10–20 см от плоскости рабочего горизонта. Основной причиной отставания фактической производительности от расчетной является сложность стыковки пилотных скважин и, как следствие, малый коэффициент использования оборудования. Благодаря использованию зонда для поиска отверстий (Grani Roc) процесс стыковки значительно упрощается. На разделке опрокинутого монолита применяется установка строчечного бурения COF-2 (оборудована двумя пневмоперфораторами с ожидаемой технической производительностью на гранитах 0,6 м/мин каждый, производитель – фирма Grani Roc). Между перфораторами фиксированное расстояние 30 см, установленное заводом-изготовителем. Шпуров бурятся диаметром 32 мм с интервалом 15 см. Для отделения блоков используются механические клинья и пневмомолоток. Готовые блоки грузятся погрузчиком в трал и перевозятся на склад (расстояние транспортирования около 400 м). На карьере работают два погрузчика: САТ 988 F (объем ковша $6,5 \text{ м}^3$), САТ 988 В (объем ковша 8 м^3). Опрокидывание вторичного монолита осуществляется с использованием гидropодушек. Для установки строчечного бурения и пневмомолотка предусмотрен компрессор (производитель – фирма Atlas Copco), а для работы АКМ – дизель-генератор.

На основе анализа передового опыта разработки гранитных месторождений в Финляндии, Италии, Португалии, Испании, России и литературных источников можно сделать следующие обобщения.

Представленные данные указывают на необходимость выбора рациональной технологической схемы добычи блочного высокопрочного камня для конкретных условий разработки.

Исследования и опыт применения алмазно-канатного способа свидетельствуют о высоком износе каната при резании камня высокой прочности. В связи с большим расходом алмазного инструмента на прочных породах и его высокой

стоимостью целесообразно применение алмазно-канатного пиления в комбинации со шпуровым способом отделения монолита.

Выводы

1. В каждом конкретном случае комбинация алмазно-канатного пиления и шпурового способа при отделении монолита будет обусловлена учетом природной трещиноватости породного массива при условии обеспечения наименьших эксплуатационных затрат на процесс подготовки объемов камня к выемке. Разделка монолита на товарные блоки, как правило, осуществляется шпуровым способом с применением различных распорных средств и должна учитывать форму природных отдельностей, слагающих монолит.

2. Совершенствование процесса подготовки блоков к выемке на месторождениях с системами круто- и пологопадающих трещин осуществляется за счет использования комбинированного способа по двухстадийной высокоуступной схеме, когда на первой стадии от породного массива отделяется монолит с помощью АКМ, а на второй стадии, после завалки монолита на рабочую площадку, осуществляется его разделка на товарные блоки с использованием станков строчечного бурения.

3. Получена зависимость величины технологических потерь блочной продукции от высоты уступа и геометрических характеристик природных трещин породного массива. Путем минимизации данной зависимости как условия, обеспечивающего повышение выхода блоков, определена оптимальная высота уступа, в соответствии с которой находятся высота и длина монолита.

4. Согласно разработанной методике для горно-геологических условий Юго-Восточного участка Нижне-Санарского месторождения гранодиоритов ($\delta_k=68^\circ$, $\gamma=65^\circ$, $l_k=1,9 \text{ м}$, $l_n=2 \text{ м}$) рассчитаны рациональные линейные параметры отделяемых монолитов:

– для 3-х отдельностей системы крутопадающих трещин массива – $H_m=5,6 \text{ м}$; $L_m=8,4 \text{ м}$; $B_m=1,7 \text{ м}$;

– для 4-х отдельностей системы крутопадающих трещин массива – $H_m=6,2 \text{ м}$; $L_m=10,7 \text{ м}$; $B_m=1,7 \text{ м}$.

Список литературы

1. Влияние высоты добычного уступа на выход мраморных блоков товарной кондиции / Першин Г.Д., Караулов Г.А., Караулов Н.Г., Караулов А.Г. // Горный журнал. 2008. №1. С. 25–26.
2. Синельников О.Б. Норвежские лабрадоритовые карьеры в районе г. Ларвик // Камень вокруг нас. 2009. С. 21–25.
3. Дубровский А.Б., Уляков М.С. Выбор оборудования при разработке Нижне-Санарского месторождения гранодиоритов // Горный журнал. 2011. №5. С. 67–70.

4. Першин Г.Д., Караулов Н.Г., Уляков М.С. The research of high-strength dimension stone mining technological schemes in Russia and abroad // Сборник научных трудов SWorld. Вып. 2. Т. 11. Одесса: Куприенко, 2013. С. 64–73.
5. Features of diamond-wire saws application for rock overburden removal at marble quarry construction / Першин Г.Д., Караулов Н.Г., Уляков М.С., Шаров В.Н. // Сборник научных трудов SWorld. 2013. Т. 14. № 3. С. 39–42.
6. Бычков Г.В., Кокунин Р.В. Оптимальные способы вскрытия рабочих горизонтов на перспективных и эксплуатирующихся месторождениях природного камня // Добыча, обработка и применение природного камня: сб. науч. тр. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2007. С. 83–92.
7. Першин Г.Д., Уляков М.С. Обоснование способов подготовки к выемке блочного природного камня высокой прочности // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2010. №4 (32). С. 14–19.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

MODERN TECHNOLOGICAL SCHEMES OF DIMENSION HIGH-STRENGTH STONE MINING

Pershin Gennadiy Daltonovich – D.Sc. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: pshenichnaya_e@mail.ru.

Karaulov Nikolay Gennadievich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: n_karaulov@mail.ru.

Ulyakov Maxim Sergeevich – Ph.D. (Eng.), Assistant Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: maxim-atlet@yandex.ru.

Abstract. This paper analyzes technological schemes of mining blocks of granite dimension stone in Finland, Italy, Portugal, Spain, and Russia. It contains an idea of increasing the yield of commercial blocks from rock mass by minimizing processing loss of block products in deposits with a complicated bedding of natural joints limited by systems of steeply and flat dipping fissures. The authors developed methods to calculate reasonable process parameters of combined preparation for dimension high-strength stone mining in deposits with a complicated mining and geological bedding of minerals, using a high-stepped two-stage scheme of mass mining, when at the first stage blocks were cut with a diamond wire saw, and at the second stage blocks tilted on an operating platform were cut into commercial blocks with topammer drilling rigs.

Keywords: Diamond wire saw, performance, blocks of granite dimension stone, primary block, secondary block, damping filling, horizontal cut, block parameters, bench height, block fissuring.

References

1. Pershin G.D., Karaulov G.A., Karaulov N.G., Karaulov A.G. The influence of the height of the bench on the output of commercial marble blocks. *Gornyy zhurnal* [Mining journal]. 2008, no. 1, pp. 25-26.
2. Sinelnikov O.B. Norwegian labradorite quarries near the city of Larvik. *Kamen' vokrug nas* [Stone around us]. 2009, pp. 21-25.
3. Dubrovsky A.B., Ulyakov M.S. Selection of equipment when developing the Nizhne-Sanarsly granodiorite deposit. *Gornyy zhurnal* [Mining journal]. 2011, no. 5, pp. 67-70.
4. Pershin G.D., Karaulov N.G., Ulyakov M.S. The research of high-strength dimension stone mining technological schemes in Russia and abroad. *Sbornik nauchnykh trudov SWorld* [Collection of scientific papers SWorld]. Iss. 2. Vol. 11. Odessa: Kuprienko, 2013, pp. 64-73.
5. Pershin G.D., Karaulov N.G., Ulyakov M.S., Sharov V.N. Features of diamond-wire saws application for rock overburden removal at marble quarry construction. *Sbornik nauchnykh trudov SWorld* [Collection of scientific papers SWorld], 2013, vol. 14, no. 3, pp. 39-42.
6. Bychkov G.V., Kokunin R.V. Optimum ways of stripping mining horizons in prospective and operating natural stone deposits. *Dobycha, obrabotka i primeneniye prirodnogo kamnya: sbornik nauchnykh trudov* [Mining, processing and application of natural stone: collection of scientific papers]. Magnitogorsk: MGTU, 2007, pp. 83-92.
7. Pershin G.D., Ulyakov M.S. Rationale for ways to prepare dimension high-strength natural stone for mining. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2010, no. 4 (32), pp. 14-19.

Першин Г.Д., Караулов Н.Г., Уляков М.С. Современные технологические схемы добычи блочного высокопрочного камня // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №3. С. 5–11.

Pershin G.D., Karaulov N.G., Ulyakov M.S. Modern technological schemes of dimension high-strength stone mining. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 3, pp. 5–11.

УДК 622.27.235

ИЗУЧЕНИЕ СОРБЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ УГОЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Медяник Н.Л., Бодьян Л.А., Варламова И.А., Гиревая Х.Я., Калугина Н.Л., Гиревой Т.А.

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

Аннотация. Приведены результаты исследования структуры труднообогатимых углей. Установлено наличие таких гетерофункциональных сорбционных центров, как гидроксильные, карбонильные и карбоксильные группы.

Выявлена корреляционная зависимость между естественной флотуемостью углей и количеством кислородсодержащих групп, теплотой смачивания, электрокинетическим потенциалом. Изучение сорбционной активности труднообогатимых углей показало, что центрами адсорбции нуклеофильных молекул воды являются электрофильные участки угольной поверхности, возникающие в результате смещения электронной плотности на кислородсодержащие группы. Проведенные квантово-химические расчеты подтвердили наличие большого количества электрофильных центров адсорбции, обуславливающих гидрофильность поверхности. Определено, что в качестве флотореагентов для извлечения органической массы угля необходимо использовать реагенты, проявляющие более жесткий нуклеофильный характер, чем молекулы воды, и способные вытеснять их в процессе флотации.

Ключевые слова: гетерофункциональные сорбционные центры, естественная флотуемость, электрофильные и нуклеофильные центры адсорбции, органическая масса угля, квантово-химические расчеты.

Введение

Исключительный дефицит углей повышенной и высокой коксуетности в последние годы в России и за рубежом компенсируется увеличением добычи труднообогатимых углей, на долю которых приходится до 60% мировых запасов угля, в связи с чем развитие теории и практики флотации является одним из приоритетных направлений реструктуризации производственного потенциала углеобогащения [1–3].

Подбор реагентов-собирателей, обеспечивающих повышение эффективности процессов флотации труднообогатимых углей, чаще всего носит эмпирический характер и не имеет достаточного теоретического обоснования, что связано с недостаточной изученностью труднообогатимых углей как объектов флотации и с недостаточной изученностью механизма взаимодействия реагентов с угольной поверхностью [4]. Вышесказанное определяет целесообразность изучения сорбционной активности угольной поверхности с целью разработки качественно нового подхода к повышению эффективности флотации путем подбора флотореагентов по цепочке теоретическое исследование – практика [5–7].

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования выбраны труднообогатимые угли, поступающие в ООО «Северсталь».

Для проведения исследования в работе использовался комплекс методов, включающий методы ИК-Фурье-спектроскопии; определения петрографического состава; пенообразующей способности; электрокинетического потенциала; иодометрического определения сорбционной активности угольной поверхности; квантово-химические исследования методом параметризации РМ 3 в приближении ограниченного и неограниченного метода Хартри-Фока (RHF/6-311 G(d)) в полноэлектронном валентно-расщепленном базисном наборе 6-311 G(d) с использованием программных пакетов HyperChem 7.5 Pro.

Результаты исследования и их обсуждение

Изучение структурных характеристик труднообогатимых углей различных шахт были проведены с использованием ИК-спектроскопии. Ре-

зультаты исследований представлены на рис. 1. Расшифровку спектров проводили по значениям характеристических частот валентных и деформационных колебаний отдельных типов связей, атомных и функциональных групп.

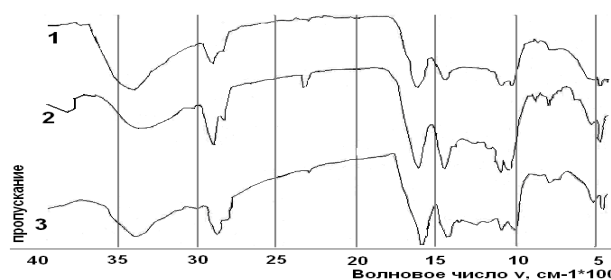


Рис. 1. ИК-спектры различных образцов труднообогатимых углей

Труднообогатимые угли разных шахт характеризуются довольно широким набором общих полос поглощения в ИК-спектре:

- полосы поглощения при 2850, 2920 см^{-1} и плечо при полосе 2960 см^{-1} соответствуют валентным колебаниям метильных $-\text{CH}_3$ (наибольшее поглощение в этой области характерно для образцов 2 и 3) и метиленовых $-\text{CH}_2-$ углеводородных групп (поглощение в этой области для исследуемых углей невелико);
- полосы поглощения при 1320 и 1460 см^{-1} деформационных колебаний $-\text{CH}_3$ и $-\text{CH}_2-$ групп;
- полоса валентных колебаний входящей в систему сопряжения группы $\text{C}=\text{C}$ при 1600 см^{-1} ;
- полоса деформационных колебаний $=\text{C}-\text{H}$ связи при 860 см^{-1} ;
- полосы поглощения при 3040 и 780 см^{-1} , принадлежащие соответственно валентным и деформационным колебаниям $\text{C}-\text{H}$ связи в ароматических структурах, подтверждают высокий водорододонорный потенциал угольной поверхности;
- наличие в углях $-\text{OH}$ -групп, в различной степени связанных водородной связью, подтверждают полосы поглощения с максимумами при 3100, 3300 и 3540 см^{-1} ;
- присутствие в углях минеральных примесей отражается в ИК-спектрах наличием полос поглощения при 3690, 3620, 1080, 1020, 1000, 900, 680, 520 и 470 см^{-1} , причем поглощение в области 3690 и 3620 см^{-1} характерно также для свободной $-\text{OH}$ -группы.

По данным результатам можно сделать выводы о том, что значительная часть кислородсодержащих групп входит в состав органической части углей. Данные спектрального анализа качественно свидетельствуют о гетерополярности угольной поверхности, ее энергетической неоднородности. В частности, преобладание в труднообогащаемых углях таких сорбционных центров, как гидроксильные, карбонильные и карбоксильные группы, оказывает существенное влияние на смачиваемость угольной поверхности и способность флотироваться [8, 9].

Определение величин теплот смачивания в исследовании проводилось для углей с различным содержанием кислородсодержащих группировок (табл. 1).

Таблица 1
Теплоты смачивания труднообогащаемых углей водой

Образец	Содержание кислорода, %	Теплота смачивания, Дж/г
1	8,89	15,5
2	8,75	13,5
3	8,29	12,2

Существование корреляции между содержанием кислорода в органической массе углей, их энергетической неоднородностью и энергией взаимодействия с водой подтверждает существенную роль кислородсодержащих групп угольной поверхности во флотационном процессе. Увеличение теплот смачивания при повышении содержания кислородсодержащих групп свидетельствует об увеличении числа активных центров адсорбции, увеличении энергии взаимодействия с водой. Таким образом, повышенное содержание кислородсодержащих групп увеличивает гидрофильность поверхности и приводит к снижению естественной флотуемости углей (табл. 2).

Таблица 2
Естественная флотуемость газовых углей

Образец	Выход концентрата, %	Зольность, %		
		концентрата	отходов	исходного угля
1	2,29	8,52	11,49	11,43
2	4,3	16,52	19,14	19,03
3	5,26	15,21	18,96	18,76

Данные таблицы позволяют констатировать пониженную природную флотуемость исследуемых углей, что, по-видимому, обусловлено высокой пористостью их поверхности и наличием функциональных кислородсодержащих групп. Естественная флотуемость как мера гидрофобности угольной поверхности находится в определенной связи с теплотами смачивания углей: с увеличением теплового эффекта естественная флотуемость уменьшается, что можно также объяснить высоким содержанием кислорода. Так, например,

образец 1 имеет низкую зольность, но пониженную флотуемость, что связано с повышенным содержанием кислородсодержащих групп и повышенным значением общей пористости. Для подтверждения этого положения проведены измерения электрокинетического потенциала (ξ -потенциала), результаты которых приведены в табл. 3.

Таблица 3
Изучение электрокинетических характеристик угольных дисперсий

Образец	Содержание кислорода, %	Зольность исходного угля, %	Естественная флотуемость, %	ξ -потенциал, мВ
1	8,89	11,43	2,29	-23,7
2	8,75	19,03	4,3	-21,8
3	8,29	18,76	5,26	-19,4

Увеличение содержания гидроксильных, карбонильных и карбоксильных функциональных групп приводит к уменьшению значения ξ -потенциала и, как следствие, увеличению гидрофильности поверхности и снижению естественной флотуемости углей.

Вследствие сложности строения органическая масса угля содержит нуклеофильные электронодонорные центры адсорбции и электрофильные электроноакцепторные центры. Общая проблема конкуренции между этими альтернативными центрами в процессе адсорбции воды и реагентов-собирателей на поверхности углей представляет исключительную важность. При воздействии сильными акцепторами электроны нуклеофильных центров адсорбции переходят к молекуле акцептора, а при обработке сильными донорами их электроны переходят на электрофильные центры, в результате образуются комплексы с переносом заряда (КПЗ) [5].

Для установления центров адсорбции воды, которые участвуют в образовании КПЗ и обуславливают гидрофильность поверхности углей, было проведено определение адсорбционной активности по йоду (электрофильному реагенту) и по тиосульфату натрия (нуклеофильному реагенту).

Йод (I_2) участвует в донорно-акцепторном взаимодействии в качестве акцептора электронов, что обусловлено наличием свободных молекулярных орбиталей. Для образования донорно-акцепторной связи молекула йода предоставляет нижнюю свободную молекулярную орбиталь (НСМО). Поглощение йода зависит от наличия на поверхности углей участков с повышенной электронодонорной способностью. Процесс иодирования позволяет выявить относительное количество электронодонорных (нуклеофильных) областей угольной поверхности, обуславливающих образование КПЗ.

Тиосульфат натрия ($Na_2S_2O_3$) является электронодонорным реагентом. Для образования до-

норно-акцепторных связей молекула тиосульфата натрия предоставляет верхнюю занятую молекулярную орбиталь (ВЗМО). По поглощению тиосульфата можно определить относительное количество электроноакцепторных (электрофильных) центров угольной поверхности, участвующих в образовании КПЗ.

Результаты исследования адсорбционной активности центров угольной поверхности приведены в табл. 4.

Таблица 4
Количество электрофильного и нуклеофильного реагентов, адсорбированных энергетическими центрами угольной поверхности

Образец	Сухой уголь		Смоченный уголь	
	Количество $(I_2) \times 10^{-3}$, моль/г	Количество $(Na_2S_2O_3) \times 10^{-3}$, моль/г	Количество $(I_2) \times 10^{-3}$, моль/г	Количество $(Na_2S_2O_3) \times 10^{-3}$, моль/г
1	0,067	0,237	0,066	0,129
2	0,047	0,249	0,047	0,102
3	0,043	0,265	0,043	0,121

Анализ экспериментальных данных привел к заключению, что количество адсорбированного электрофильного реагента для сухого и смоченного угля практически одинаково, тогда как количество нуклеофильного реагента, адсорбированного смоченной угольной поверхностью, в 1,8–2,4 раза меньше, чем сухой. Следовательно, именно на положительно заряженных (электрофильных) участках поверхности газовых углей адсорбируются молекулы воды.

Вода проявляет по отношению к угольной поверхности жесткий нуклеофильный характер, так как имеет следующие квантово-химические характеристики: дипольный момент $\mu = 1,739$ D; значение энергии верхней занятой молекулярной орбитали $\epsilon_m = -12,3$ эВ; значение энергии нижней свободной молекулярной орбитали $\epsilon_{m+1} = 4,1$ эВ; максимальный отрицательный заряд «–0,359» сконцентрирован на атоме кислорода, а положительные заряды «+0,178» – на атомах водорода. Для образования донорно-акцепторной связи молекула воды предоставляет свою верхнюю занятую молекулярную орбиталь ВЗМО. Проекционная карта МЭСП молекулы воды представлена на рис. 2.

Таким образом, низкая природная флотированность исследуемых газовых углей, их повышенная гидрофильность обусловлены наличием на угольной поверхности электрофильных участков, являющихся центрами адсорбции нуклеофильных молекул воды.

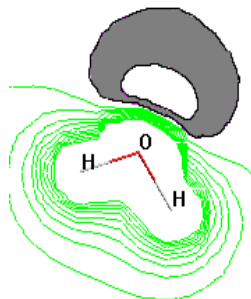


Рис. 2. Проекционная карта МЭСП молекулы воды

Для более глубокого изучения электрофильных центров адсорбции были проведены расчеты квантово-химических параметров функциональных групп поверхности ОМУ (табл. 5) и получены проекционные карты молекулярных электростатических потенциалов (МЭСП) (рис. 3).

Таблица 5
Квантово-химические параметры функциональных групп поверхности ОМУ

Функциональные группы	μ , D	ϵ_m , эВ	ϵ_{m+1} , эВ	max «+»	max «–»
Гидроксильная	1,142	–9,18	–0,29	0,1963	0,2279
Карбоксильная	2,251	–10,13	–0,53	0,4315	0,4036
Карбонильная	2,571	–9,71	–0,42	0,4401	0,4012

Примечание: μ – дипольный момент, D; ϵ_m – энергия верхней занятой молекулярной орбитали (ВЗМО), эВ; ϵ_{m+1} – энергия нижней свободной молекулярной орбитали (НСМО), эВ; max «+» – максимальный положительный заряд; max «–» – максимальный отрицательный заряд.

Электронные свойства активных центров ОМУ, а именно дипольный момент, потенциал ионизации ПИ (численно равен энергии ВЗМО, взятой с обратным знаком), значение сродства к электрону СЭ (численно равно энергии НСМО, взятой с обратным знаком), значения максимальных положительного и отрицательного зарядов, определяют сорбционную способность угольной поверхности [4].



Рис. 3. Проекционные карты МЭСП функциональных групп поверхности ОМУ

Проекционные карты молекулярных электростатических потенциалов (см. рис. 3) показывают преобладающее количество положительно заряженных электрофильных центров (серый цвет – участки с электрофильными свойствами, черный цвет – участки с нуклеофильными свойствами). Атомы, на которых сконцентрированы положительные заряды, и будут являться центрами адсорбции молекул воды или конкурирующих с ними нуклеофильных реагентов.

Заключение

Изучение сорбционной активности угольной поверхности показало преобладание на ней электрофильных центров, возникающих за счет смещения электронной плотности на атомы кислорода. Увеличение числа электрофильных центров труднообогатимых углей обуславливает гидрофильность их поверхности и низкую природную флотуемость. Гидрофобизация угольной поверхности возможна нуклеофильными реагентами, способными к вытеснению адсорбированных электрофильными участками молекул воды.

Список литературы

1. Reddick J.F., Von Blottnitz H., Kothuis B. Cleaner production in the South African coal mining and processing industry: a case study investigation // International Journal of Coal Preparation and Utilisation. 2008, vol. 28, pp. 224–236.
2. Медяник Н.Л., Варламова И.А., Гиревая Х.Я. Разработка реагента для флотации углей низкой стадии метаморфизма на основе квантово-химических расчетов Магнитогорск, 2006. 13 с. Деп. в ВИНТИ 25.01.06, №72-B2006.
3. Horsfall D.W., Zitron Z., de Korte J. The treatment of ultrafine coal, especially by froth flotation // Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. 1986, vol. 86, no. 10, pp. 401–407.
4. Гиревая Х.Я. Повышение эффективности флотации газовых углей на основе квантово-химического обоснования выбора реагентов: дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск, 2006. 167 с.
5. Медяник Н.Л., Гиревая Х.Я., Варламова И.А. Квантово-химический подход к выбору реагента-собирающего для флотации углей низкой стадии метаморфизма // Кокс и химия. 2006. № 1. С. 8–13.
6. Изучение свойств органических молекул квантово-химическими методами / Медяник Н.Л., Калугина Н.Л., Варламова И.А., Гиревая Х.Я., Бодьян Л.А. Магнитогорск, 2013. 14 с. Деп. в ВИНТИ 01.08.2013, №224-B2013.
7. Влияние квантово-химических параметров органических соединений на их сорбционные свойства / Варламова И.А., Гиревая Х.Я., Калугина Н.Л., Медяник Н.Л. Магнитогорск, 2009. 15 с. Деп. в ВИНТИ 26.02.2009, №110-B2009.
8. Продукт химической деструкции полиэтилентерефталата как комплексный реагент для извлечения органической массы угля / Бодьян Л.А., Варламова И.А., Гиревая Х.Я., Калугина Н.Л., Медяник Н.Л. // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 2. С. 700.
9. Кубак Д.А., Петухов В.Н., Семенов Д.Г. Исследование влияния группового химического состава комплексных реагентов на эффективность флотации углей // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. № 4 (44). С. 5–10.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

STUDY OF THE SORPTION ACTIVITY OF A COAL SURFACE

Medyanik Nadezhda Leonidovna – D.Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chemistry Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: medyanikmagnitka@mail.ru.

Girevaya Khanifa Yanshaevna – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: hanifa70@list.ru.

Kalugina Natalia Leonidovna – Ph.D. (Education), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: nkalugina@gmail.com.

Varlamova Irina Alexandrovna – Ph.D. (Education), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: Varlamova156@gmail.com.

Bodyan Lyubov Anatolyevna – Ph.D. (Education), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: bodyan_n@mail.ru.

Girevoy Timur Andreevich – student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: hanifa70@list.ru.

Abstract. This paper contains studies of the hard-cleaning coal structure. The presence of such heterofunctional sorption centers as hydroxyl, carbonyl and carboxyl groups was found. The authors found a correlation between the natural floatability of coals and the quantity of oxygen-containing groups, heat of wetting, electrokinetic potential. Studies of the sorption activity of hard-cleaning coals showed that adsorption centers of nucleophilic water molecules were electrophilic areas of the coal surface resulted from a displacement of the electron density to oxygen-containing groups. Quantum chemical calculations confirmed the presence of a large number of electrophilic adsorption centers which caused the hydrophilicity of the coal

surface. It was determined that flotation agents used to extract the coal organic matter had to be agents showing a harder nucleophilic nature than water molecules and having the ability to substitute them in flotation.

Keywords: Heterofunctional sorption centers, natural floatability, electrophilic and nucleophilic adsorption centers, coal organic matter, quantum chemical calculations.

References

1. Reddick J.F., Von Blottnitz H., Kothuis B. Cleaner production in the South African coal mining and processing industry: a case study investigation. International Journal of Coal Preparation and

- Utilisation. 2008, Vol. 28, pp. 224-236.
- Medyanik N.L., Varlamova I.A., Girevaya Kh.Ya. *Razrabotka reagenta dlya flotatsii uglei nizkoy stadii metamorfizma na osnove kvantovo-khimicheskikh raschetov* [Quantum chemical calculations to design the flotation reagent for coals with a low stage of metamorphism]. Deposited manuscript no. 72-B2006, 25.01.2006.
 - Horsfall D.W., Zitron Z., de Korte J. The treatment of ultrafine coal, especially by froth flotation. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*. 1986, vol. 86, no. 10, pp. 401-407.
 - Girevaya Kh.Ya. *Povyshenie effektivnosti flotatsii gazovykh uglei na osnove kvantovo-khimicheskogo obosnovaniya vybora reagentov* [Improving efficiency of the gas coal flotation on the basis of the quantum chemical rationale for a selection of reagents Ph.D. (Eng.) dissertation.]. Magnitogorsk, 2006. 167 p.
 - Medyanik N.L., Girevaya Kh.Ya., Varlamova I.A. *Kvantovo-khimicheskii podkhod k vyboru reagenta-sobiratelya dlya flotatsii uglei nizkoy stadii metamorfizma* [A quantum chemical approach to a selection of a collecting agent for flotation of coals with a low stage of metamorphism]. *Koks i himiya* [Coke and chemistry]. 2006, no. 1, pp. 8-13.
 - Medyanik N.L., Kalugina N.L., Varlamova I.A., Girevaya Kh.Ya., Bodyan L.A. *Izuchenie svoystv organicheskikh molekul kvantovo-khimicheskimi metodami* [Study of properties of organic molecules applying quantum chemical methods]. Deposited manuscript no. 224-B2013, 01.08.2013.
 - Varlamova I.A., Girevaya Kh.Ya., Kalugina N.L., Medyanik N.L. *Vliyaniye kvantovo-khimicheskikh parametrov organicheskikh soedineniy na ikh sorbtionnye svoystva* [The influence of quantum chemical parameters of organic compounds on their sorption properties]. Deposited manuscript no. 110-B2009, 26.02.2009.
 - Bodyan L.A., Varlamova I.A., Girevaya Kh.Ya., Kalugina N.L., Medyanik N.L. *Produkt khimicheskoy destrukttsii polietilentereftalata kak kompleksnyy reagent dlya izvlecheniya organicheskoy massy uglia* [A product of the chemical destruction of polyethylene terephthalate as a complex reagent to extract the coal organic matter]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education]. 2014, no. 2, p. 700.
 - Kubak D.A., Petuhov V.N., Semenov D.G. *Issledovanie vliyaniya gruppovogo khimicheskogo sostava kompleksnykh reagentov na effektivnost flotatsii uglei* [Study of the influence of a group chemical composition of complex reagents on the efficiency of coal flotation]. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2013, no. 4 (44), pp. 5-10.

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.

Medyanik N.L., Girevaya Kh.Ya., Kalugina N.L., Varlamova I.A., Bodyan L.A., Girevoy T.A. Study of the sorption activity of a coal surface. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 3, pp. 11–16.

УДК 622.765.061

МОДИФИЦИРОВАННЫЕ ЖИРНЫЕ КИСЛОТЫ, ИХ МОЛЕКУЛЯРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ПРОГНОЗА ФЛОТАЦИИ РУД ЩЕЛОЧНОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Соложенкин П.М.¹, Дегодя Е.Ю.², Шаватулева О.П.²

¹ Институт проблем комплексного освоения недр Российской академии наук, Таджикистан

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

Аннотация. В статье предпринята попытка показать эффективность исследований с использованием компьютерных технологий и химических программ. Исследованы флотационные активности нового класса флотационных реагентов. Молекулярное моделирование модифицированных реагентов было выполнено при использовании параметров компьютера. Флотационные опыты проводились на кальците, барите, целестине, флюорите и кварце. Изучены реагенты при флотации различных флюоритовых руд. Для оптимизации флотации флюоритовых руд были использованы сочетания реагентов. Проведенные эксперименты показали, что применение комбинации реагентов при флотации флюоритовых руд позволит получать флюоритовый концентрат с массовой долей CaF_2 , равной 96,3%, при извлечении 85,4% CaF_2 .

Ключевые слова: минералы щелочноземельных элементов, собиратели, флотация, заряды атомов, активность собирателя, молекулярное моделирование.

Введение

Одним из путей регулирования свойств собирателей оксигидрильного типа является введение заместителей в углеводородный фрагмент карбоновой кислоты. При этом изменение свойств флотореагента, связывается с изменением гидрофобных взаимодействий в модифици-

рованном углеводородном радикале [1–5].

Было установлено, что сульфопальмитиновая кислота является более сильным собирателем апатита и гематита, чем незамещенные кислоты, а также обладает более селективным действием [6].

Введение заместителя в α -положение усиливает кислотные свойства собирателя, что приводит к большей ионизации и соответственно сорбции со-

бирателя минералами, а также расширяет оптимум флотации кальцита и касситерита, а вольфрама сдвигает в более кислую область. По этой причине α -бромпальмитат обладает большим собирательным действием, чем пальмитат [7].

В качестве собирателей несulfидных минералов предложен ряд ω -(N, N-диалкилдитиокарбамато) ундеканатов натрия [6]. Было проведено физико-химическое изучение ω -(N, N-диэтилдитиокарбамато) ундеканата натрия (ДЭДТКУ), ω -(N, N-дибутилдитиокарбамато) ундеканата натрия (ДБДТКУ). Изучаемые реагенты имеют общую формулу



Для глубокого понимания вопросов взаимосвязи пространственного строения молекул не только с физическими и химическими свойствами веществ, но и с проявляемой ими химической активностью весьма продуктивной формой процесса исследования в последнее время является использование компьютерных технологий и химических программ [7–13].

В работе использовали молекулярное моделирование (ММ) для определения оптимальной молекулярной структуры и расчета значений атомных зарядов, энергии ВЗМО (английское HOMO) и НСМО (английское LUMO) кластеров и собирателей флотации в вакууме. Установленная теоретическая методология и полученные результаты исследований позволяют понять на атомном уровне взаимодействие и механизм образования связи между собирателем и атомами кластера минерала.

Методология экспериментов

Современные способы построения объемных моделей минералов и реагентов реализованы в программе ChemBio 3D специализированного комплекса ChemOffice Combridge Soft, а также модуля MOPAC 2012 в вакууме. Данные получены после молекулярной минимизации ММ 2 с использованием расчетов по РМ 7.

В настоящее время созданы (сконструированы) модели различных минералов элементов платиновой группы (ЭПГ), подгруппы мышьяка менделеевской таблицы, а также сульфидрильные собиратели флотации, названные нами кластерами минералов (реагентов). Так, их строение соответствует химической формуле, а расстояние между отдельными атомами соответствует известным табличным данным. Была разработана методика создания флотационных комплексов, включающая кластер минерала и связанного с атомом (атомами) минерала щелочноземельных элементов различных собирателей (композитов). Эти реакции впервые позволили создать комплекс, практически подобный соединению при закреплении собирателя на поверхности минерала в процессе реальной флотации. Были рассчитаны молекулярные орбитали для исследуемых соединений HOMO (highest occupied molecular orbital), LUMO (lowest unoccupied molecular orbital), в том числе и SOMO (second occupied molecular orbital).

Кластеры минералов щелочноземельных элементов

На рис. 1 представлены кластеры минералов и их 3D модели.

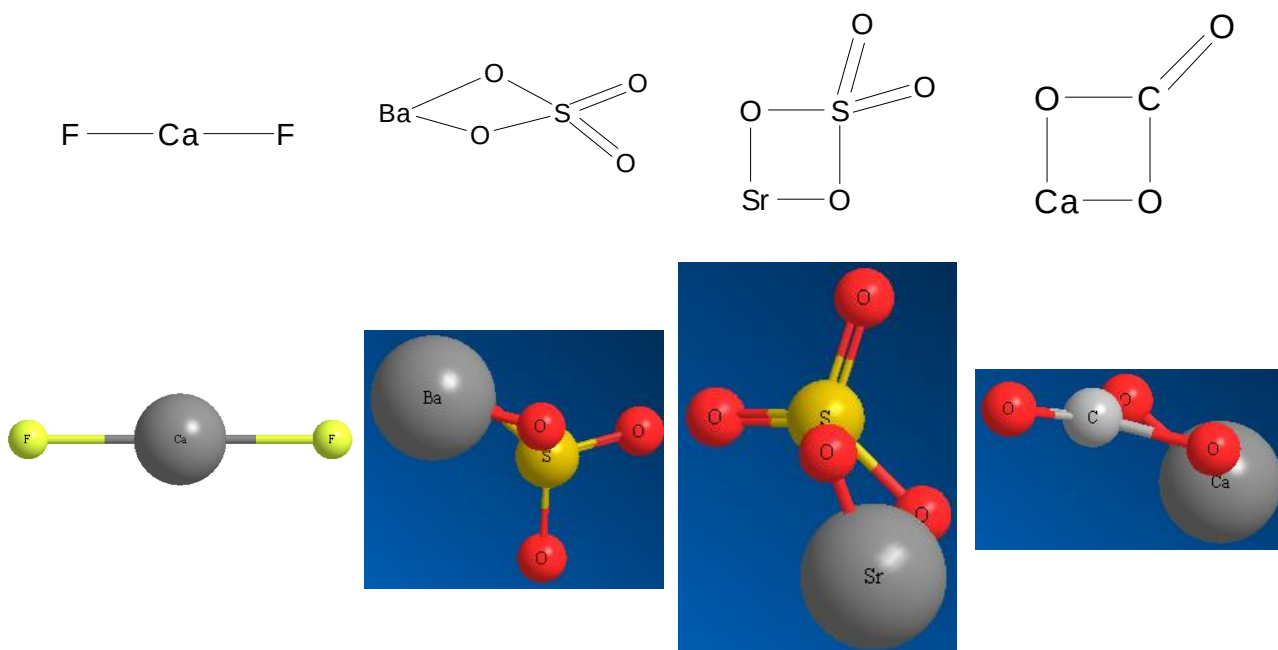


Рис. 1. Кластеры минералов CaF_2 , $CaCO_3$, $SrSO_4$, $BaSO_4$ и их 3D модели

В табл. 1 представлены компьютерные параметры исследованных кластеров минералов.

Таблица 1
Компьютерные параметры кластеров минералов

Параметр	CaF ₂	CaCO ₃	SrSO ₄	BaSO ₄
Теплота образования, кДж/моль	-705,73126	-630,66268	-1015,91510	-732,80300
Общая энергия, эВ	-955,28184	-1031,11866	-1378,21197	-1375,83345
Электронная энергия, эВ	-1312,85488	-2544,49855	-3894,04973	-3863,18595
НОМО LUMO, эВ	-13,166 0,657	-9,420 -1,965	-9,490 -0,288	-8,689 -0,142
	Заряды, е	Заряды, е	Заряды, е	Заряды, е
	Ca 1,327146 F -0,663573 F -0,663573 Диполь 0	C 0,866645 O -0,826726 Ca 1,332443 O -0,826342 O -0,546020 Диполь 13,904	Sr 1,627575 O -1,181113 O -1,181021 S 2,681875 O -0,974953 O -0,972364 Диполь 15,825	Ba 1,653514 O -1,173378 O -1,172696 S 2,681582 O -0,969523 O -1,019500 Диполь 21,654

Теплота образования изменяется в следующем порядке: CaCO₃>CaF₂> BaSO₄>SrSO₄, в таком же порядке изменяется и дипольный момент, то есть увеличивается вандерваальсово взаимодействие. Заряды на атоме кальция меньше зарядов на атоме бария и стронция.

В случае SrSO₄ и BaSO₄ должно увеличиваться электростатическое взаимодействие минералов с собирателем.

Установлено, что при взаимодействии минералов с водой уменьшается теплота образования для CaF₂ до 303,6519 кДж/моль (-1009,3831 - (-705,73126)), для CaCO₃ – 335,43862 кДж/моль (966,10142 - (-630,66268)), для SrSO₄ – 312,1891 кДж/моль (-1328,10428 - (-1015,91510)), уменьшается заряд на атоме Ca, а также на атоме фтора флюорита. Диполь для флюорита в этом случае составил 4,497, для кальцита – 17,628 и для целестина –19,112 дебая. LUMO орбиталь имеет положительное значение для CaF₂ и SrSO₄.

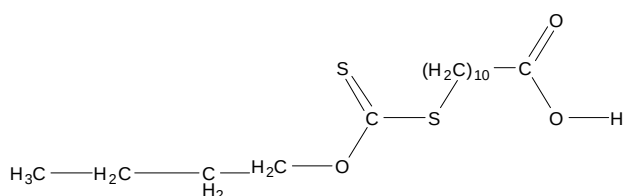
Кластеры флотационных реагентов

На рис. 2 показаны молекулярные модели (бутилксантато)ундекановой (11-((butoxycarbonylthio)undecanoic acid), (диэтилдитиокарбамато)ундекановой (11-((diethylcarbamoithiyl)thio) undecanoic acid) и (дибутилдитиокарбамато)ундекановой (11-((dibutylcarbamoithiyl))thio) undecanoic acid) кислот.

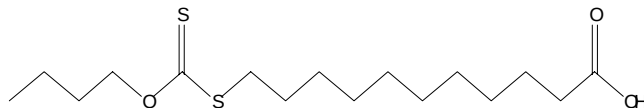
В табл. 2 представлены компьютерные параметры исследованных флотационных реагентов.

Установлено, что ¼ вандерваальсово взаимодействие увеличивается с удлинением углеводородной цепи. Все исследуемые реагенты имеют ¼ вандерваальсово взаимодействие, что является больше, чем у олеиновой кислоты. Это может положительно сказаться на извлечении минералов при использовании данных реагентов.

а



б



в

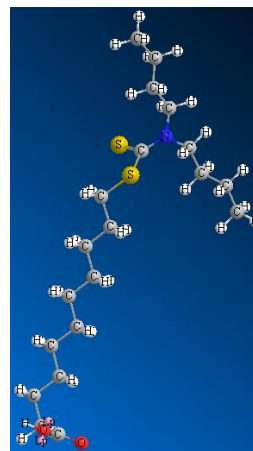
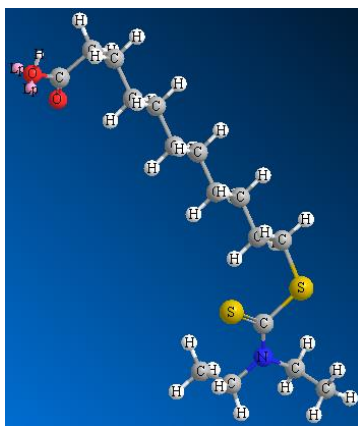


Рис. 2. Исходные схемы и молекулярные модели: а - (ксантато)ундекановой; б - (диэтилдитиокарбамато)ундекановой; в - (дибутилдитиокарбамато)ундекановой кислот

Таблица 2

Компьютерные параметры флотационных реагентов

Параметры	Реагенты				
	(C ₂ H ₅) ₂ NCS ₂ ундекановая кислота Итерация 383	(C ₄ H ₉) ₂ NCS ₂ ундекановая кислота Итерация 460	Олеиновая кислота	(C ₄ H ₉ O) ₂ PS ₂ H ундекановая кислота	(Диизобутил- дитиофосфиново) ундекановая кислота
Растяжение валентных связей	1,1604	1,3306	1,0032	1,5661	1,4608
Изгиб валентных углов	4,9058	5,4514	2,4598	7,2770	6,9302
Поправки изгиб-растяжение	0,4848	0,5408	0,3164	0,5763	0,5777
Внутреннее вращение	1,9897	3,3070	-1,6081	3,3270	3,0302
Не ¼ вандерваальсово взаимодействие	-3,7662	-3,9787	-3,4402	-6,6459	-8,0166
¼ вандерваальсово взаимодействие	11,6094	14,7534	10,7999	16,0514	11,1872
Диполь/дипольное взаимодействие	1,9300	1,8744	1,6872	3,6340	5,1632
Общая стерическая энергия, ккал/мол	18,3138	23,2788	11,2182	25,7859	20,3327

Исследование комплексов между кластерами минералов и кластерами модифицированных собирателей

Изучено прикрепление модифицированных жирных кислот к кластерам минералов CaF₂, CaCO₃, SrSO₄, BaSO₄. На рис. 3 показано только прикрепление модифицированных жирных кислот к кластеру минерала CaF₂.

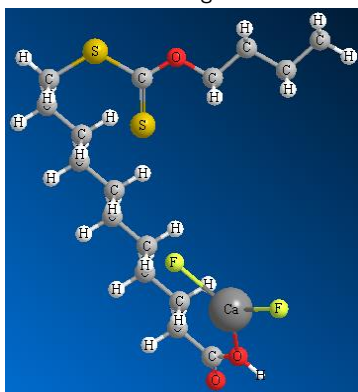
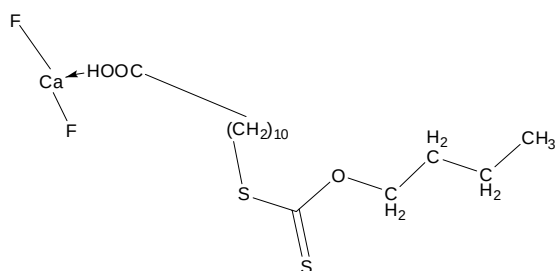


Рис. 3. Схема прикрепления модифицированной жирной кислоты к кластеру минерала CaF₂ и ее 3D модель

Проанализированы и обобщены физико-химические данные о созданных комплексах. Установлено, что НОМО и LUMO несут отрицательный заряд. По известным уравнениям были рассчитаны абсолютная жесткость и электроот-

рицательность.

Исследованы комплексы C₄H₉OCS₂ - (CH₂)₁₀COOH с катионом Ca, Sr, Ba по хелатной и бидентатной схемам связи. Расстояние между атомами O(11)-Ca(12) составляет 1,595 Å, а между C(1)-O(10) – 1,208 Å, что подтверждает тесное взаимодействие между собирателем и атомом кальция.

Необходимо отметить, что в бидентатном C₄H₉OCS₂-(CH₂)₁₀COOCa комплексе наблюдаются α SOMO LUMO и β BETA SOMO LUMO орбитали, которые будут способствовать образованию обратной донорной ковалентной связи. Наблюдается классический перенос заряда с донора собирателя на акцептор минерала и при этом уменьшается заряд на атоме кластера.

Расчет ПОАС

Для установления флотационной способности разработан прогноз оценки активности собирателя - взаимодействия собирателя с кластером минерала - в виде разницы общей энергии комплекса и суммы энергии кластера и энергии собирателя, определяемый по выражению:

$$\Delta E = E_{\text{комплекс}} - (E_{\text{кластера}} + E_{\text{собирателя}}), \text{ эВ (ПОАС)}$$

Чем меньше величина ПОАС, тем более предпочтительно взаимодействие собирателя с кластером минерала.

По данным ПОАС можно отметить, что C₄H₉OCS₂-(CH₂)₁₀ (ПОАС=8134,518 эВ) более активен при флотации минералов щелочноземельных элементов, чем олеиновая кислота (ПОАС=4866,881 эВ).

Изменение ПОАС по общей энергии можно расположить в следующем ряду CaCO₃>BaSO₄>

$\text{SrSO}_4 > \text{CaF}_2$, то есть этот ряд соответствует порядку флотации минералов. При учете электронной энергии ПОАС изменяется в следующем порядке: $\text{SrSO}_4 > \text{BaSO}_4 > \text{CaCO}_3 > \text{CaF}_2$.

Изучено изменение ПОАС от композитов модифицированных жирных кислот. ПОАС значительно снижается в присутствии бинарной смеси собирателей (дибутилдитиокарбамато) ундекановой кислоты.

Электронная энергия системы $\text{C}_4\text{H}_9\text{OCS}_2(\text{CH}_2)_{10} + \text{олеиновая кислота} + \text{CaF}_2$ уменьшилась на 14048,864 эВ (-23007,083–(-3353,58 -5604,639) по сравнению с электронной энергией системы с индивидуальными собирателями, то есть композит из бинарных собирателей более предпочтителен для флотации руд.

Флотация минералов и руд щелочноземельных элементов

Для оптимизации флотации флюоритовой руды были также испытаны сочетания реагента ДЭДТКУ с олеиновой кислотой и ДБДТКУ в соотношении 1:1. Применение сочетания ДЭДТКУ с олеиновой кислотой позволило повысить массовую долю и извлечение флюорита по сравнению с технологическими показателями, полученными при отдельном их использовании [14–18]. Качество концентрата в этом случае значительно повышается.

Использование бинарного сочетания олеиновой кислоты (100 г/т) и ω -(N, N - диэтилдитиокарбамато) ундеканата натрия (100 г/т) в соотношении 1:1 при флотации флюоритовой руды с массовой долей CaF_2 , равной 23,4%, позволяет получить флюоритовый концентрат с массовой долей флюорита, равной 96,3%, при извлечении 85,35% [19].

Выводы

1. Проведено молекулярное моделирование различных кластеров минералов щелочноземельных элементов и модифицированных жирных кислот. Установлены основные компьютерные параметры.

2. Разработан индекс ПОАС для анализа активности связывания модифицированных жирных кислот с атомом кластера минералов щелочноземельных элементов – Ca, Sr и Ba.

3. Исследован перенос заряда. При бидентантном связывании наблюдается классический перенос заряда с донора собирателя на акцептор минерала и при этом уменьшается заряд на атоме кальция кластера. Этот факт является первым экспериментальным подтверждением передачи зарядов атомов донора собирателя на акцептор-

кластер минерала.

4. Предложен композит реагентов для эффективной флотации флюорита. Созданы виртуальные реагенты типа $(\text{C}_4\text{H}_9\text{O})_2\text{PS}_2(\text{CH}_2)_{10}\text{COOH}$, $(\text{CH}_3)_2\text{CHCH}_2)_2\text{PS}_2(\text{CH}_2)_{10}\text{COOH}$ ($\text{isoC}_4\text{H}_9)_2\text{PS}_2(\text{CH}_2)_{10}\text{COOH}$ и предсказаны их технологические свойства в процессе флотации.

Список литературы

1. Физико-химические основы теории флотации / Богданов О.С., Гольман А.М., Каковский И.А. и др. // Оксидрильные реагенты. М.: Наука, 1983. 264 с.
2. Рябой В. И. О поверхностных реакциях флотореагентов с минералами на основе их донорно-акцепторного взаимодействия // Обогащение руд. 2008. №6. С. 24–30.
3. Рябой В.И. Создание и применение более эффективных реагентов на основе физико-химических представлении // Обогащение руд. 2002. №1. С. 19–23.
4. Хан Г.А., Габриелова Л.И., Власова Н.С. Флотационные реагенты и применение. М.: Недра, 1986. 271 с.
5. Сравнение собирательного действия пальмитата и бромпальмитата при флотации несulfидных минералов / Янис Н.А., Рябой В.И., Артамонова Л.А., Кривелева Э.Д., Петрова Л. Н. // Обогащение руд цветных металлов. Ч. 1. Исследования по теории и технологии обогащения руд цветных металлов. Вып. 141. Ленинград: Механообр, 1974. С. 26–39.
6. Solozhenkin Peter, Solozhenkin Oleg. Computer chemistry flotation of reagents: updating sulphhydrylic of collectors carboxyl by acids and tetraphenylantimon (V). Proceeding 14 th Conference on Environment and Mineral Processing. 2010. Czech Republic, part II, pp. 51–56.
7. Соловьев М.Е., Соловьев М.М. Компьютерная химия. М.: Изд-во «СО-ЛОН-Пресс», 2005. 536 с.
8. Соложенкин П.М., Соложенкин О.И. Компьютерный дизайн сульфидрильных реагентов и их производных // Цветные металлы. 2010. № 7. С. 11–14.
9. Соложенкин П.М., Соложенкин О.И. Компьютерное моделирование структуры сульфидрильных собирателей и их производных // Обогащение руд. 2010. №4. С. 31–34.
10. Solozhenkin Peter M, Solozhenkin Oleg I. and Sanda Krausz. Prediction of Efficiency of Flotation Collectors Based on Quantum Chemical Computations. Books of Abstracts. XXVI International Mineral Processing Congress-IMPC-2012. New Delhi, India, 2012, vol. 2, 638 p.
11. Solozhenkin Peter M. Creative and forecasting of properties effective, less toxic reagents of the flotation reagents on a basis quantum - mechanical representations for the purpose of complex extraction colour and precious metals. Scientific and technical aspects of preservation of the environment. The survey information. VINITI, Release №1, Moscow, 2013, 120 p.
12. Solozhenkin P.M. Quantum-chemical and molecular-dynamic aspects of forecasting of properties of collectors of metals from productive solutions of nonferrous metals, Works of the international scientific symposium «Week of the miner 2012», The collection of articles, Separate release of the mountain-information analytical bulletin (scientific and technical magazine) M: Publishing house «Mountain book», 2012. NOR1. P. 431–455.
13. Соложенкин П.М., Соложенкин О.И. Компьютерное моделирование жирных кислот // Изв. вузов. Цветная металлургия. 2012. №1. С. 17–21.
14. Дегодя Е.Ю. Совершенствование технологии обогащения труднообогатимых флюоритовых руд Суранского месторождения // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. Магнитогорск, 2004. №3. С. 89–92.
15. Чижевский В.Б., Дегодя Е.Ю. Разработка технологии обогащения труднообогатимых флюоритовых руд Суранского ме-

- сторожения // IV Конгресс обогатителей стран СНГ: сб. тез. докл. М., 2003. С. 133–135.
16. Дегодя Е.Ю., Шавакулева О.П. Исследование закономерностей флотации флюорита различными собирателями // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Екатеринбург, 2006. С. 114–117.
 17. Дегодя Е.Ю., Бахарева О.Ю., Загузина А.А. Изучение адсорбционной и флотационной активности различных модифициций флюорита // Молодежь. Наука. Будущее: сб. науч. трудов. Магнитогорск, 2006. Вып. 6. С. 315–317.
 18. Чижевский В.Б., Дегодя Е.Ю. Повышение селективности перемешивающих операций методом пропарки карбонатно-флюоритовых руд Суранского месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень. М.: МГГУ, 2006. №2. С. 390–392.
 19. Соложенкин П. М Молекулярный дизайн флотореагентов, эффективных при флотации несulfидных руд // Цветные металлы. 2008. №12. С. 28–33.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

MODIFIED FATTY ACIDS, THEIR MOLECULAR MODELLING FOR THE FORECAST OF FLOTATION OF ORES OF ALKALINE-EARTH ELEMENTS

Solozhenkin Petr Mikhailovich – D.Sc. (Eng.), Professor, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences (IPKON RAS), Chief Researcher of IPKON RAS, Honored Scientist of the Russian Federation, Academician of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan. E-mail: solozhenkin@mail.ru.

Degodia Elena Yurievna – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7 (3519) 29-85-55. E-mail: magtu_opi@mail.ru.

Shavakuleva Olga Petrovna – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7 (3519) 29-85-55. E-mail: magtu_opi@mail.ru.

Abstract. This article intends to show efficiency of research using computer technologies and chemical programs. The flotation activity of flotation reagents of a new class was studied. Molecular modelling of the modified reagents was performed applying computer parameters. Flotation tests were carried out on calcite, barite, celestine, fluorite and quartz. The reagents under study were tested at flotation of various fluorite ores. To optimize the flotation of the fluorite ores, combinations of reagents were used. The tests showed that a combination of reagents at such flotation of fluorite ores would contribute to production of a fluorite concentrate with the CaF_2 mass fraction of 96.3 %, at extraction - CaF_2 of 85.4 %.

Keywords: Minerals of alkaline-earth elements, collecting agents, flotation, atomic charges, activity of the collecting agent, molecular modelling.

References

1. Physico-chemical fundamentals of the theory of flotation. Bogdanov O.S., Golman A. M., Kakovsky I. A. and others. *Oksgidirilnye reagenty* [Oxyhydride reagents]. Moscow: Science, 1983. 264 p.
2. Ryaboi V.I. On the surface reactions of flotation reagents with minerals on the basis of their donor-acceptor interaction. *Obogashhenie rud* [Ore dressing]. 2008, no. 6, pp. 24–30.
3. Ryaboi V.I. Creation and use of more efficient agents based on the physico-chemical presentation. *Obogashhenie rud* [Ore dressing]. 2002, no. 1, pp. 19–23.
4. Khan G. A., Gabrielova L. I., Vlasova N.S. Flotation reagents and application. Moscow: Mineral resources, 1986, 271 p.
5. Yanis N. A., Ryaboi V.I., Artamonova L. A., Kriveleva E. D., Petrova L. N. Comparison of a collective action of palmitate and bromopalmitate in flotation of non-sulphide minerals. *Obogashhenie rud tsvetnykh metallov. Chast' 1. Issledovaniya po teorii i tekhnologii obogashheniya rud tsvetnykh metallov* [Non-ferrous metal ore dressing. Part 1. Research on the theory and technology of non-ferrous metal ore dressing]. Issue 141. Leningrad: Mekhanobr, 1974, pp. 26–39.
6. Solozhenkin Peter, Solozhenkin Oleg. Computer chemistry flotation of reagents: updating sulphidic of collectors carboxyl by acids and tetraphenylantimon (V). Proceedings of the 14th Conference on Environment and Mineral Processing. 2010. Czech Republic, part II, pp. 51–56.
7. Soloviev M. E., Soloviev M. M. *Komp'yuternaya khimiya* [Computational chemistry]. SOLON-Press Publishing House, 2005, 536 p.
8. Solozhenkin P. M. Solozhenkin O. I. Computer-aided design of sulfhydryl reagents and their derivatives. *Tsvetnye metally* [Non-ferrous metals]. 2010, no. 7, pp. 11–14.
9. Solozhenkin P. M. Solozhenkin O. I. Computer modeling of the structure of sulfhydryl collecting agents and their derivatives. *Obogashhenie rud* [Ore dressing]. 2010, no. 4, pp. 31–34.
10. Solozhenkin Peter M., Solozhenkin Oleg I. and Sanda Krausz. Prediction of Efficiency of Flotation Collectors Based on Quantum Chemical Computations. Books of Abstracts. XXVI International Mineral Processing Congress-IMPC -2012. New Delhi, India, 2012, no. 2, p.638.
11. Solozhenkin Peter M. Creative and forecasting of properties effective, less toxic reagents of the flotation reagents on a basis quantum - mechanical representations for the purpose of complex extraction non-ferrous and precious metals. Scientific and technical aspects of environment protection. Survey information. VINITI, Release 1, Moscow, 2013, 120 p.
12. Solozhenkin P.M. Quantum-chemical and molecular-dynamic aspects of forecasting of properties of collectors of metals from productive solutions of nonferrous metals. Proceedings of the international scientific symposium "Week of the miner 2012". Collection of articles. A special issue of the Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal). Moscow: Mountain Book Publishing House, 2012, NOR1, pp. 431–455.
13. Solozhenkin P. M., Solozhenkin O.I. Computer modeling of fatty acids. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya* [News of higher educational institutions. Non-ferrous metallurgy]. 2012, no. 1, pp. 17–21.
14. Degodia E. Yu. Improving the technology of processing of rebellious fluorite ores of the Suranskoe field. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2004, no. 3, pp. 89–92.
15. Chizhevsky V. B., Degodia E. Yu. Development of the technology of processing of rebellious fluorite ores of the Suranskoe field. *IV Kongress obogatiteley stran SNG: sb. tez. dokl.* [The 4th Congress of Dressers from the CIS countries: collection of abstracts of papers]. Moscow, 2003, pp. 133–135.
16. Degodia E. Yu., Shavakuleva O. P. Study of regularities of fluorite flotation by various collecting agents. *Nauchnye osnovy i praktika pererabotki rud i tekhnogennogo syr'ya: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Scientific basis and practice of processing of ores and industrial raw materials: proceed-

- ings of the International Scientific and Practical Conference]. Ekaterinburg, 2006, pp. 114-117.
17. Degodia E. Yu., Bakhareva O. Yu., Zaguzina A. A. The study of the adsorption and flotation activity of various modifications of fluorite. *Molodezh'. Nauka. Budushhee: sbornik nauchnykh trudov* [Youth. Science. Future: Collection of scientific papers]. Magnitogorsk, 2006, no. 6, pp. 315-317.
 18. Chizhevsky V. B., Degodia E. Yu. The increase in the selectivity of cleaning operations by steaming carbonate-fluorite ores of the Suranskoe field. *Gornyj informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining Informational and Analytical Bulletin]. Moscow: Moscow State Mining University, 2006, no. 2, pp. 390-392.
 19. Solozhenkin P. M. Molecular design of flotation reagents, which are efficient in flotation of non-sulphide ores. *Tsvetnye metally* [Non-ferrous metals]. 2008, no. 12, pp. 28-33.

Соложенкин П.М., Дегодя Е.Ю., Шавакулева О.П. Модифицированные жирные кислоты, их молекулярное моделирование для прогноза флотации руд щелочноземельных элементов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №3. С. 16–22.

Solozhenkin P.M., Degodia E.Yu., Shavakuleva O.P. Modified fatty acids, their molecular modelling for the forecast of flotation of ores of alkaline-earth elements. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 3, pp. 16–22.

УДК 669.337

ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ САМОПРОИЗВОЛЬНОГО ДОСТИЖЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ХЛОРИРУЮЩЕГО ОБЖИГА ЧЕРНОВОГО МЕДНОСУЛЬФИДНОГО КОНЦЕНТРАТА

Каримова Л.М., Кайралапов Е.Т.

ТОО «Инновация», Караганда, Казахстан

Аннотация. Проведены многофакторные эксперименты по окислительно-хлорирующему обжигу гранулированных черновых медных сульфидных концентратов с целью выявления влияния температуры воздуха и скорости фильтрации воздуха через навеску, размера гранул, содержания серы и влажности гранул на максимальную температуру обжига. Получены математические модели, которые использованы для определения оптимальных областей проведения обжига и расчета кажущейся энергии активации методом Киссенгера.

Ключевые слова: гранулы, окислительно-хлорирующий обжиг, шахтная печь, многофакторная модель, графическая зависимость, диффузионный режим.

Введение

В работах [1–3] практическое осуществление низкотемпературного окислительно-хлорирующего обжига рассмотрено на сульфидных медных концентратах с добавлением NaCl и KCl в муфельных печах или во вращающих трубчатых печах на дисперсной шихте.

Известно, что технология обжига медных сульфидных концентратов в смеси с хлоридом натрия (галит) идет в присутствии кислорода воздуха с выделением тепла и частичным переходом серы из сульфида железа (пирита) в газовую фазу в виде сернистого ангидрида [4]. Поэтому для ее проведения требуется обеспечить контакт частиц концентрата с галитом и доступ кислорода при непрерывном движении смеси.

Новые возможности для работы всех современных обжиговых печей предоставляет окатывание шихты с получением гранулированного материала, в котором частицы шихты находятся в

наилучшем контакте в составе каждой гранулы. Однако размер гранул, выходящих из промышленных грануляторов, отличается широкой фракцией от 2–3 до 18–20 мм. В трубчатых печах такие гранулы частично разрушаются при пересыпании, как в мельницах, самоизмельчение и пылеунос остается на том же уровне. В печах КС тонкие фракции гранул выносятся с газовым потоком, а крупные оседают на подине газораспределительной решетки, приводя к необходимости ее чистки. Кроме того, гранулы среднего класса растрескиваются с образованием до 30–40% мелких осколков и они выносятся из печи с отходящими газами. Поэтому наилучшими обжиговыми аппаратами для гранулированных материалов являются шахтные печи. В них гранулированный материал находится в состоянии плотного слоя, через который подаваемый газ (воздух) фильтруется и обеспечивает наибольшую скорость химических реакций и наиболее полный теплообмен материала с газом. Слой опускается в шахте только под действием силы тяжести за счет

работы узла разгрузки по шахте в виде тарельчатого или лоткового питателя. В наиболее известной конструкции шахтной печи воздух или топочные газы подаются через боковые фурмы.

В работе [5] предложена шахтная печь с каскадом наклонных решеток, по которым материал пересыпается с одной на другую, меняя направление и тем самым перемешиваясь по всей поверхности решеток, а газы подводятся через беспробивные распределительные решетки специальной конструкции. С этой целью проведено изучение перегрева шихты за счет химических реакций при хлорирующем обжиге чернового медносульфидного концентрата и необходимостью выбора обжигового агрегата для обеспечения экзотермических температурных условий хлорирования концентрата.

Материалы и результаты исследований

Концентрат шихтовали с галитом (NaCl) – 10% от массы и в качестве связующего использовали раствор NaCl [6, 7]. Шихта подвергалась окатыванию на лабораторном грануляторе с диаметром чаши 0,6 м, высотой борта 15 см при скорости вращения 20 об/мин и подаче связующего разбрызгиванием. Фракции гранул необходимого размера отсеивали на ситах. Химический состав исследуемых концентратов представлен в табл. 1.

Таблица 1
Содержание основных компонентов в концентрате, %

Cu	S	Fe
0,8	1,0	5,04
3,91	2,95	4,69
4,73	2,97	5,46
5,38	4,87	7,82

Лабораторные исследования проводили в шахтной электропечи, имеющей реактор из кварцевой трубки диаметром 40 мм. Вовнутрь реактора помещали корзинку с влажными гранулами, в середине гранул и снизу корзины находились термодпары. Воздух подавали с температурой от 370 до 500°C. Рост температуры за счет выделения тепла химических реакций фиксировали по времени с одновременным определением максимально достигнутой температуры. Прекращение эксперимента осуществлялось по мере снижения температуры навески до начальной заданной температуры воздуха. Эксперименты проводили путем последовательного изучения действующих факторов методом Зейделя-Гаусса-Мальшева [8, 9]. Изучали влияние содержания серы в концентрате β_s , %; заданной температуры воздуха $t_{в.}$, °C, размера гранул d , мм, расхода воздуха V , м/с, на экзотермичность процесса обжига или на температуру навески

процесса хлорирующего обжига с понижением до заданной температуры воздуха. В результате фиксировалась зависимость температуры навески по продолжительности обжига при воздействии той или иной комбинации учитываемых факторов. Такие зависимости соответствуют кривым нагревания, регистрируемым при дифференциально-термическом анализе, но в данном случае на более крупной навеске и при более широкой вариации условий обжига.

Результаты экспериментов по экзотермическому хлорирующему обжигу медного сульфидного концентрата гранулированного раствором NaCl приведены на рис. 1.

Как показано на рис. 1, температура пика больше всего зависит от заданной температуры воздуха (рис. 1, б), и увеличение ее приводит к повышению максимальной температуры. Эти данные были использованы для определения энергии активации процесса по подобию с обработкой данных также неизотермических процессов, фиксируемых ДТА – анализом по методу Киссингера [10, 11]:

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

где T_m – температура пика, К; v – скорость нагревания, град/с; R – газовая постоянная; A – константа.

Скорость нагревания по данным рис. 1, б определяли по псевдопрямолинейным восходящим участкам графических зависимостей слева от максимума. С этой целью для каждой зависимости выбраны следующие участки.

Для $t_{гозд} = 370^\circ\text{C}$ от 6,56 до 9,12 мин с температурой от 220 до 400°C. Скорость нагревания составила $v = (320-220)/(9,12-6,56) = 39,062^\circ\text{C}/\text{мин} = 0,6510^\circ/\text{с}$. $T_m = 425^\circ\text{C} = 698\text{ K}$.

Для $t_{гозд} = 400^\circ\text{C}$ от 5,26 до 8,23 мин с температурой от 240 до 380°C. Скорость нагревания составила $v = (380-240)/(8,23-5,26) = 47,138^\circ\text{C}/\text{мин} = 0,7856^\circ/\text{с}$. $T_m = 490^\circ\text{C} = 763\text{ K}$.

Для $t_{гозд} = 440^\circ\text{C}$ от 4,4 до 8,15 мин с температурой от 280 до 460°C. Скорость нагревания составила $v = (460-280)/(8,15-4,4) = 48,0^\circ\text{C}/\text{мин} = 0,8^\circ/\text{с}$. $T_m = 515^\circ\text{C} = 788\text{ K}$.

Для $t_{гозд} = 460^\circ\text{C}$ от 3,45 до 5,56 мин с температурой от 300 до 440°C. Скорость нагревания составила $v = (440-300)/(5,56-3,45) = 66,35^\circ\text{C}/\text{мин} = 1,1058^\circ/\text{с}$. $T_m = 550^\circ\text{C} = 823\text{ K}$.

Для $t_{гозд} = 500^\circ\text{C}$ от 4,06 до 5,16 мин с температурой от 340 до 460°C. Скорость нагревания составила $v = (460-340)/(5,16-4,06) = 109,091^\circ\text{C}/\text{мин} = 1,8182^\circ/\text{с}$. $T_m = 600^\circ\text{C} = 873\text{ K}$.

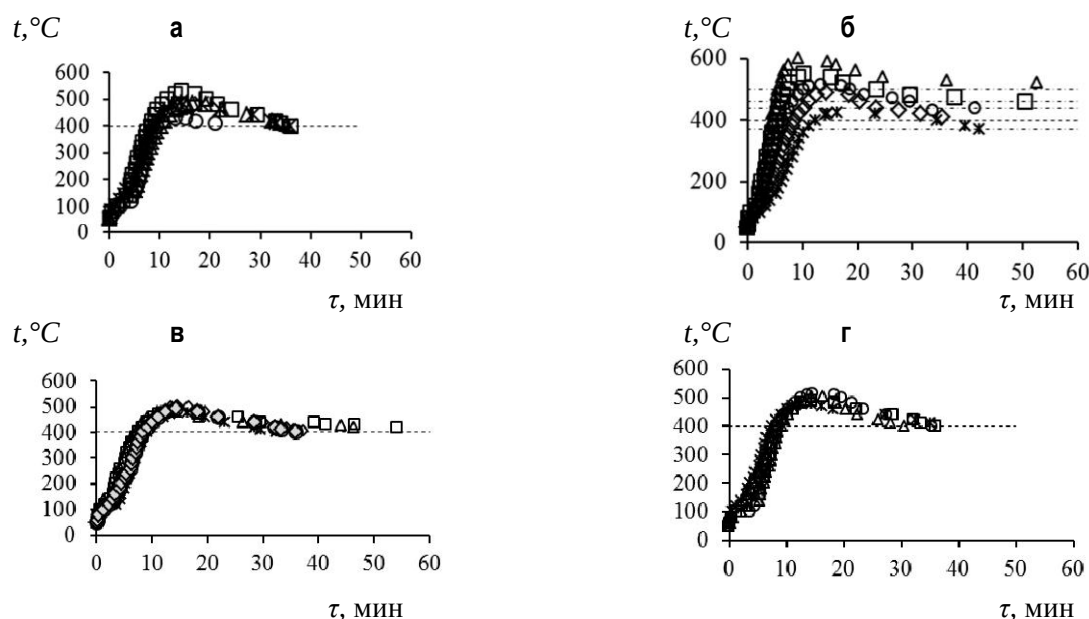


Рис. 1. Влияние различных факторов на экзотермичность процесса хлорирующего обжига гранулированного чернового медного сульфидного концентрата с галитом:

а – влияние содержания серы в концентрате при $t = 400^{\circ}\text{C}$, $V = 0,048 \text{ м/с}$, $d = 8 \text{ мм}$ ($\circ$ – при содержании $\beta_{\text{S}} = 1,0\%$; Δ – $\beta_{\text{S}} = 3,0\%$; $*$ – $\beta_{\text{S}} = 2,97\%$; $\square$ – $\beta_{\text{S}} = 4,87\%$); **б** – влияние заданной температуры воздуха при $V = 0,048 \text{ м/с}$, $d = 8 \text{ мм}$; ($*$ – начальная температура воздуха 370°C ; $\diamond$ – 400°C ; $\circ$ – 440°C ; $\square$ – 460°C ; Δ – 500°C); **в** – влияние расхода воздуха при $t = 400^{\circ}\text{C}$, $V = 0,048 \text{ м/с}$; ($*$ – $0,016 \text{ м/с}$, $\circ$ – $0,032 \text{ м/с}$, $\diamond$ – $0,048 \text{ м/с}$, Δ – $0,064 \text{ м/с}$, $\square$ – $0,0796 \text{ м/с}$); **г** – влияние размера гранул; ($\circ$ – размер гранул 4 мм ; Δ – 6 мм ; $\square$ – $8,5 \text{ мм}$; $*$ – 11 мм). Штриховая линия – заданная температура воздуха

Кажущаяся энергия активации составила $28,316 \text{ кДж/моль}$. Она свидетельствует о протекании процесса в диффузионном режиме и контролируется доступом кислорода воздуха вовнутрь гранулы.

Результаты обработки экспериментальных данных приведены на **рис. 2**. Из них следует, что наиболее сильно действующими факторами оказываются, как и следовало ожидать, содержание серы и заданная температура воздуха. Увеличение размера гранул также закономерно приводит к уменьшению температуры максимума, что согласуется с лимитированием процесса внутренней диффузией.

Значимость частных зависимостей

определяли по коэффициенту нелинейной множественной корреляции R и его значимости [9, 12, 13] t_R (табл. 2).

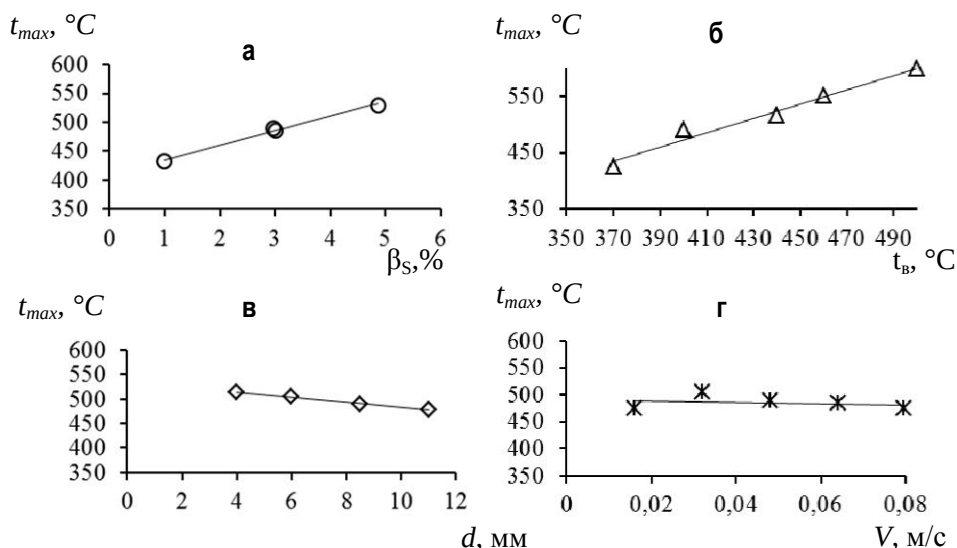


Рис. 2. Влияние различных факторов на максимальную температуру хлорирующего обжига гранулированного чернового медного сульфидного концентрата с галитом: а – содержания серы в концентрате; **б** – заданной температуры воздуха; **в** – размера гранул; **г** – расхода воздуха

Таблица 2
Частные функции максимальной температуры хлорирующего обжига с определением коэффициента R и его значимость t_R

Функции	R	Условие $t_R > 2$
$t_{\max} = 25,346\beta_s + 409,22$	0,9932	103,30 > 2
$t_{\max} = 1,272t_g - 36,172$	0,9818	47,11 > 2
$t_{\max} = -5,3634d + 536,56$	0,9986	490,80 > 2
$t_{\max} = -124,52V + 491,97$	0,0634	0 < 2

Полученные уравнения для максимальной температуры окислительно-хлорирующего обжига с учетом значимых функций (см. табл. 2) для описания совокупности действующих факторов обобщаются согласно [8, 9] в виде их произведения с нормировкой по центральному экспериментальному значению 482,7°C. Обобщенное уравнение примет вид

$$t_{\max} = 4,293 \cdot 10^{-6} (25,346\beta_s + 409,22) \times (1,272t_g - 36,172)(-5,3634d + 536,56).$$

При сопоставлении результатов эксперимента и расчета получены значения $R=0,9691$ и $t_R=52,76 > 2$, что подтверждает адекватность описания данных эксперимента настоящим уравнением.

Полученное обобщенное уравнение позволяет выявить совместное влияние действующих факторов с помощью многофакторной номограммы (табл. 3). При хлорирующем обжиге максимальная температура процесса ограничивается по условиям спекания гранул при температуре более 700°C [1–3]. Как отмечено в работе [2], для достижения высокой степени хлорирования в присутствии минерализатора необходимы повышенные температуры, но при этом велика вероятность выбросов сернистых газов в атмосферу.

В целом можно отметить, что ввиду отсутствия ограничений по полноте обжига вплоть до 700°C [2] область допустимых режимов оказалась более широкой. Вместе с тем абсолютные значения максимумов температуры при хлорирующем обжиге являются более высокими и при содержании серы более 8% могут достигать 900–1000°C.

Таблица 3
Многофакторная номограмма по влиянию на максимальную температуру хлорирующего обжига изученных действующих факторов. Выделены области по условию $t_{\max} > 650^\circ\text{C}$

t _в , °C	d, mm	β _с ,%								
		1	2	3	4	5	6	8	10	12
360		405,4	429	452,7	476,3	500	523,6	570,9	618,2	665,5
	6	397	420,1	443,3	466,4	489,6	512,7	559	605,3	651,6
	8	388,5	411,2	433,8	456,5	479,1	501,8	547,1	592,4	637,8
	10	380,1	402,2	424,4	446,6	468,7	490,9	535,2	579,6	623,9
	12	371,6	393,3	415	436,7	458,3	480	523,4	566,7	610,1
	14	363,2	384,4	405,5	426,7	447,9	469,1	511,5	553,8	596,2
380	4	429,8	454,9	480	505,1	530,1	555,2	605,3	655,5	705,6
	6	420,9	445,4	470	494,5	519,1	543,6	592,7	641,8	690,9
	8	411,9	436	460	484	508,1	532,1	580,1	628,2	676,2
	10	403	426,5	450	473,5	497	520,5	567,5	614,5	661,5
	12	394	417	440	463	486	509	554,9	600,9	646,8
	14	385,1	407,6	430	452,5	474,9	497,4	542,3	587,2	632,2
400	4	454,3	480,8	507,3	533,8	560,3	586,8	639,8	692,8	745,8
	6	444,8	470,8	496,7	522,7	548,6	574,6	626,5	678,3	730,2
	8	435,4	460,8	486,2	511,6	537	562,3	613,1	663,9	714,7
	10	425,9	450,8	475,6	500,4	525,3	550,1	599,8	649,5	699,2
	12	416,5	440,7	465	489,3	513,6	537,9	586,5	635,1	683,6
	14	407	430,7	454,5	478,2	502	525,7	573,2	620,6	668,1
420	4	478,8	506,7	534,6	562,5	590,4	618,4	674,2	730,1	785,9
	6	468,8	496,1	523,5	550,8	578,2	605,5	660,2	714,9	769,5
	8	458,8	485,6	512,3	539,1	565,9	592,6	646,1	699,7	753,2
	10	448,8	475	501,2	527,4	553,6	579,7	632,1	684,5	736,8
	12	438,9	464,5	490,1	515,7	541,3	566,9	618,1	669,3	720,4
	14	428,9	453,9	478,9	504	529	554	604	654	704,1
440	4	503,2	532,6	561,9	591,3	620,6	650	708,7	767,4	826,1
	6	492,7	521,5	550,2	578,9	607,7	636,4	693,9	751,4	808,8
	8	482,2	510,4	538,5	566,6	594,8	622,9	679,1	735,4	791,6
	10	471,8	499,3	526,8	554,3	581,8	609,3	664,4	719,4	774,4
	12	461,3	488,2	515,1	542	568,9	595,8	649,6	703,4	757,2
	14	450,8	477,1	503,4	529,7	556	582,3	634,9	687,5	740

t _в , °C	d, мм	β _с , %								
		1	2	3	4	5	6	8	10	12
460	4	527,7	558,4	589,2	620	650,8	681,5	743,1	804,6	866,2
	6	516,7	546,8	576,9	607,1	637,2	667,3	727,6	787,9	848,2
	8	505,7	535,2	564,7	594,2	623,7	653,2	712,1	771,1	830,1
	10	494,7	523,5	552,4	581,3	610,1	639	696,7	754,4	812,1
	12	483,7	511,9	540,1	568,3	596,6	624,8	681,2	737,6	794
	14	472,7	500,3	527,9	555,4	583	610,6	665,7	720,9	776
500	4	576,6	610,2	643,8	677,5	711,1	744,7	812	879,2	946,5
	6	564,6	597,5	630,4	663,3	696,3	729,2	795,1	860,9	926,8
	8	552,6	584,8	617	649,2	681,5	713,7	778,1	842,6	907,1
	10	540,5	572,1	603,6	635,1	666,7	698,2	761,2	824,3	887,3
	12	528,5	559,4	590,2	621	651,8	682,7	744,3	806	867,6
	14	516,5	546,7	576,8	606,9	637	667,2	727,4	787,7	847,9
520	4	601	636,1	671,1	706,2	741,2	776,3	846,4	916,5	986,6
	6	588,5	622,8	657,2	691,5	725,8	760,1	828,8	897,4	966,1
	8	576	609,6	643,2	676,8	710,4	744	811,1	878,3	945,5
	10	563,5	596,3	629,2	662,1	694,9	727,8	793,5	859,3	925
	12	551	583,1	615,2	647,4	679,5	711,6	775,9	840,2	904,4
	14	538,4	569,8	601,2	632,7	664,1	695,5	758,3	821,1	883,9
540	4	625,5	662	698,4	734,9	771,4	807,9	880,8	953,8	1027
	6	612,4	648,2	683,9	719,6	755,3	791,1	862,5	933,9	1005
	8	599,4	634,4	669,3	704,3	739,3	774,2	844,2	914,1	984
	10	586,4	620,6	654,8	689	723,2	757,4	825,8	894,2	962,6
	12	573,4	606,8	640,3	673,7	707,1	740,6	807,5	874,3	941,2
	14	560,3	593	625,7	658,4	691,1	723,8	789,1	854,5	919,8

Выводы

1. С целью выявления влияния температуры воздуха и его скорости фильтрации через навеску, размера гранул, содержания серы и влажности гранул на максимальную температуру в навеске обжига впервые проведены многофакторные эксперименты по окислительно-хлорирующему обжигу черновых медносульфидных концентратов и получены математические модели процесса, которые использованы для определения оптимальных областей проведения обжига с точки зрения попадания в зону допустимых температур по условиям недопущения спекания материала. При этом установлена возможность осуществления процесса в более широком диапазоне температур, 400–700°C.

2. Впервые политермы обжига, полученные в результате многофакторных экспериментов, использованы по подобию с методом обработки данных ДТА по Киссенгеру для определения энергии активации процессов обжига, которая составила 28,316 кДж/моль. Она свидетельствует о протекании процесса в диффузионном режиме [14] и контролируется доступом кислорода воздуха вовнутрь гранулы.

Список литературы

- Медведев А.С., Со Ту. Особенности электрохимических реакций, сопровождающих хлорирующий обжиг сульфидных медных концентратов // Изв. вузов. Цветная металлургия. 2012. №3. С. 3–6.
- Медведев А.С., Со Ту, Хамхаш А., Птицын А.М. Вариант переработки сульфидного медного концентрата комбинированным способом // Цветные металлы. 2010. № 1. С. 33–36.
- Со Ту. Физико-химические основы комбинированного способа переработки сульфидного медного концентрата Удоканского месторождения: автореф. ... дис. канд. техн. наук. Москва, 2011. 25 с.
- Смирнов В.И., Тихонов А.И. Обжиг медных руд и концентратов. Свердловск: Metallurgizdat, 1958. 280 с.
- Инновационный патент РК №29308. Обжиговая шахтная печь для непрерывной сушки, обжига и охлаждения гранулированных материалов / Малышев В.П., Юн А.Б., Жумашев К.Ж., Лариов В.А., Захарьян С.В., Каримова Л.М., Кайраларов Е.Т., Чен В.А., Терентьева И.В., Назаренко И.А., Макашева А.М., Айбеков Н.Ж. // Бюл. № 12 от 15.12.2014.
- Комплексная переработка лежалых хвостов Жезказганской обогатительной фабрики / Юн А.Б., Захарьян С.В., Чен В.А., Каримова Л.М., Терентьева И.В. // Материалы Международной научной ассоциации «Science &Genesis». Копенгаген, 2014. С. 7–13.
- Yun A., Zakharyan S., Chen V., Terentyeva I., Karimova L. Granules strength and chloridizing roasting of tailing concentrate at Zhezkazgan concentrator // Chemical Engineering Journal, vol. 1, no. 2, September 2014, pp.1–7.
- Малышев В.П. Математическое описание результатов многофакторного эксперимента, проведенного по методу Зейделя-Гаусса // Вестник АН Каз ССР. 1978. №4. С. 31–38.
- Малышев В.П. Кинетический и технологический анализ обобщающих математических моделей химико-металлургических процессов // Доклады Национальной академии наук РК. 2008. №2. С. 13–18.
- Kissinger H.E. Кинетика реакций и ДТА // Analyt. Chem. 1957. V. 29. №11.
- Kissinger H.E. Изменение температурного пика в зависимости от скорости нагрева в ДТА // Nat.Bur.of Standards Res. 1956. V. 57. P. 2712.

12. Дукарский О.М., Закурдаев А.Г. Статистический анализ и обработка данных на ЭВМ «Минск-22». М.: Статистика, 1971. 179 с.
13. Сисков В.И. Корреляционный анализ в экономических исследованиях. М.: Статистика, 1975. 168 с.
14. Эммануэль Н.М., Кнорре Д.Г. Курс химической кинетики. М.: Высш. шк., 1974. 400 с.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DEPENDENCE OF SPONTANEOUS ACHIEVEMENT OF MAXIMUM CHLORIDIZING ROASTING TEMPERATURE OF ROUGH COPPER SULPHIDE CONCENTRATE

Karimova Lyutsiya Monirovna – Ph.D. (Chemistry), LLP Innovatsiya, Karaganda, Kazakhstan. E-mail: lut-sia.08@mail.ru.

Kairalapov Yerlan Tokpaevich – Ph.D. (Eng.), Senior Researcher, LLP Innovatsiya, Karaganda, Kazakhstan. E-mail: kairalapov.e@mail.ru.

Abstract. The authors conducted multifactorial experiments on oxidizing and chloridizing roasting of pelletized rough copper sulphide concentrates in order to identify the influence of air temperature and rate of filtration through a sample, the size of pellets, the sulphur content and pellet moisture on maximum roasting temperature. The mathematical models were developed to determine optimal areas of roasting and calculate the apparent activation energy by applying the Kissinger method.

Keywords: Pellets, oxidizing and chloridizing roasting, shaft furnace, multifactor model, graph, diffusion mode.

References

1. Medvedev A.S., So Tu. Features of electrochemical reactions accompanying the chloridizing roasting of sulphide copper concentrates. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya* [News of higher educational institutions. Non-ferrous metallurgy]. 2012, no. 3, pp. 3-6.
2. Medvedev A.S., So Tu, Khamkhash A., Ptitsyn A.M. An option of processing sulphide copper concentrate in a combined way. *Tsvetnye metally* [Non-ferrous metals]. 2010, no. 1, pp. 33-36.
3. So Tu. *Fiziko-khimicheskie osnovy kombinirovannogo sposoba pererabotki sulfidnogo mednogo koncentrata Udokanskogo mestorozhdeniya: avtoreferat ... dissertatsiya kandidata tekhnicheskikh nauk* [Physical and chemical fundamentals of a combined processing method for sulphide copper concentrate of the Udokan deposit. Extended abstract of Ph.D. dissertation]. Moscow, 2011, 25 p.
4. Smirnov V.I., Tikhonov A.I. *Obzhig mednykh rud i koncentratov* [Roasting of copper ores and concentrates]. Sverdlovsk: Metallurgizdat, 1958, 280 p.
5. Malyshev V.P., Yun A.B., Zhumashev K.Zh., Larikov V.A., Zakharyan S.V., Karimova L.M., Kayralapov E.T., Chen V.A. Terentyeva I.V., Nazarenko I.A., Makasheva A.M., Aibekov N.Zh. A roasting shaft furnace for continuous drying, roasting and cooling of granular materials. Innovation patent of RK 29308. Bulletin No. 12 dated 15.12.2014.
6. Yun A.B., Zakharyan S.V., Chen V.A., Karimova L.M., Terentyeva I.V. An overall processing of old tailings at Zhezkazgan *Materialy Mezhdunarodnoj nauchnoj assotsiatsii «Science & Genesis»* [Dressing Plant. Proceedings of the International Scientific Association «Science & Genesis»]. Copenhagen, 2014, pp. 7-13.
7. Yun A.B., Zakharyan S.V., Chen V.A., Terentyeva I.V., Karimova L.M. Granules strength and chloridizing roasting of tailing concentrate at Zhezkazgan concentrator. *Chemical Engineering Journal*, vol. 1, no. 2, September 2014, pp. 1-7.
8. Malyshev V.P. A mathematical description of the results of multifactorial experiments conducted by the Gauss-Seidel method. *Vestnik AN Kaz SSR* [Bulletin of the Academy of Sciences of the Kazakh Soviet Socialist Republic]. 1978, no. 4, pp. 31-38.
9. Malyshev V.P. A kinetic and technological analysis of generalized mathematical models of chemical and metallurgical processes. *Doklady Natsional'noj akademii nauk RK* [Reports of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan]. 2008, no. 2, pp.13-18.
10. Kissinger H.E. Reaction kinetics by DTA. *Analyt. Chem.* 1957, vol. 29, no. 11.
11. Kissinger H.E. Variation of peak temperature with heating rate in DTA. *Nat.Bur.of Standards Res.*, 1956, vol. 57, 2712 p.
12. Dukarsky O.M., Zakurdaev A.G. *Statisticheskij analiz i obrabotka dannykh na EHM «Minsk-22»* [Statistical analysis and data processing on the computer Minsk-22]. Moscow: Statistics, 1971, 179 p.
13. Siskov V.I. *Korrelatsionnyj analiz v ekonomicheskikh issledovaniyakh* [Correlation analysis in economic research]. Moscow: Statistics, 1975, 168 p.
14. Emmanuel N.M., Knorre D.G. *Kurs khimicheskoy kinetiki* [A course in chemical kinetics]. Moscow: Higher School, 1974, 400 p.

Каримова Л.М., Кайраляпов Е.Т. Изучение зависимости самопроизвольного достижения максимальной температуры хлорирующего обжига черноватого медносульфидного концентрата // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №3. С. 22–27.

Karimova L.M., Kairalapov Y.T. Dependence of spontaneous achievement of maximum chloridizing roasting temperature of rough copper sulphide concentrate. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 3, pp. 22–27.

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

УДК 669.162.261.3/669.162.262.5

ВЫЯВЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ НАБОРА КОМПОНЕНТОВ СЫРЬЯ В БУНКЕР БЗУ ЛОТКОВОГО ТИПА ФИЗИЧЕСКИМ МОДЕЛИРОВАНИЕМ

Собагатуллин С.К., Харченко А.С.

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

Аннотация. На физической модели БЗУ лоткового типа исследовали действующие режимы односкиповой загрузки компонентов сырьевых материалов в шихтовый бункер доменной печи ОАО «ММК». Рассмотрели влияние изменения последовательности набора материалов в бункер на равномерность их поступления в колошниковое пространство при содержании 30% окатышей в железорудной части шихты. Выявили, что наиболее рациональным в существующих условиях является следующая последовательность набора материалов в бункер: на дно 17% агломерата от его расхода, затем окатыши, коксовый орешек, руда и оставшееся количество агломерата.

Ключевые слова: доменная печь, БЗУ лоткового типа, шихта, окружное распределение, агломерат, окатыши, руда, коксовый орешек.

Введение

Режим загрузки шихтовых материалов в колошниковое пространство печи относится к основным средствам организации хода доменного процесса. Для интенсивного протекания его с низким удельным расходом кокса необходимо обеспечивать равномерное окружное и оптимальное по радиусу колошника распределение материалов. Поскольку шихта доменных печей является многокомпонентной, в сырьевой части которой помимо агломерата и окатышей могут присутствовать кварцит, известняк, железная и марганцевая руды, коксовый орешек или коксовая фракция, возникают сложности в обеспечении равномерного окружного распределения материалов [1, 2]. Особенно они проявляются на доменных печах, оснащенных компактным бесконусным загрузочным устройством (БЗУ) лоткового типа. В связи с этим градиент температур по периферии зачастую выше, чем на печах с конусным загрузочным устройством. Такой режим может сопровождаться ухудшением показателей хода доменного процесса [3]. Расположение коксового орешка вблизи с агломератом или окатышами изменяет скорость и степень восстановления железорудных материалов [4, 5]. Концентрация орешка в определенном секторе колошника затрудняет его расходование на реак-

ции прямого восстановления, что приводит к снижению фильтрующей способности кокса в горне печи [6–8]. Неравномерное распределение промывочных материалов или состава сырья в целом является причиной точечного воздействия на состояние горна, неравномерности в количестве и свойствах чугуна и шлака по окружности, нарушений в движении потоков шихты и газа.

Расположение новых порций материалов на поверхности засыпи зависит от угла наклона и скорости вращения лотка, траектории движения их от лотка до поверхности ранее сформировавшегося слоя, количества и последовательности поступления компонентов из шихтового бункера по наименованиям и крупности, поведения материалов на поверхности слоя шихты после загрузки [9, 10]. При этом последовательность набора компонентов сырья в шихтовый бункер [1, 2, 11] относится к определяющим факторам.

Предложено несколько способов определения рационального размещения материалов в шихтовом бункере. Авторы работы [1] получили детерминированную математическую модель. В работе [11] предлагается метод построения математической модели формирования порции в шихтовом бункере и истечения ее в колошниковое пространство печи проведением экспериментов с использованием импульсных электромагнитных датчиков, которые возбуждают им-

пульсные вихревые токи в железорудном сырье и измеряют вторичное электромагнитное поле. Имеются расчеты траектории движения шихтовых материалов на поверхность засыпи [12].

Для решения задачи улучшения работы печи повышением равномерности окружного распределения шихтовых материалов лотковым загрузочным устройством необходимо дополнение и уточнение физическим моделированием результатов, полученных в вышерассмотренных работах.

Физическое моделирование

Для выявления рационального режима набора компонентов сырья в доменные печи ОАО «ММК» провели ряд экспериментов на лабораторной установке однотрактового компактного загрузочного устройства лоткового типа (рис. 1). Размеры модели пропорционально уменьшены в 5 раз по отношению к линейным размерам компактного БЗУ доменных печей.

Моделировали применительно к доменной печи объемом 1370 м³ ОАО «ММК» существующие режимы односкиповой загрузки железорудной части шихты в бункер БЗУ, содержащей следующие компоненты, %: агломерат – 70, окатыши – 30; добавки (железная руда и коксовый орешек) – 2, дополнительно к агломерату и окатышам.



Рис. 1. Физическая модель однотрактового компактного загрузочного устройства лоткового типа

В серии опытов № 1 исследовали режимы загрузки материалов «добавки на дно скипа». В опытах компоненты шихты размещали в бункере

в следующей последовательности: вниз помещали агломерат, после чего коксовый орешек, окатыши, затем руду. Получаемое после открытия шихтового затвора содержание материалов по видам в процессе выпуска их из бункера приведено на рис 2, 3.

Видно, что первая порция была сформирована из одного агломерата. Оставшиеся порции содержали от 50 до 70% агломерата и от 30 до 50% окатышей. Максимальное количество железной руды наблюдали в порциях № 2 и 3, хотя её загружали в бункер последней. Максимальное количество коксового орешка, размещенного в бункере после агломерата, наблюдали в конце выпуска. Это соответствует закономерностям формирования эллипсоидов выпуска и разрыхления. Первыми шихтовый бункер покидали частицы, расположенные над выпускным отверстием, образуя воронку и эллипсоид выпуска. В остальной части бункера в движение вовлекались материалы, находящиеся в зоне эллипсоида разрыхления. Образование его позволяет компонентам с наиболее высокой плотностью и крупностью перемещаться сверху вниз интенсивнее по сравнению с остальными. Коксовый орешек может отставать. Такая последовательность выпуска материалов из бункера БЗУ обеспечила среднюю величину среднеквадратического отклонения содержания компонентов в порциях, отобранных по ходу выпуска, равную 9,1% (см. таблицу).

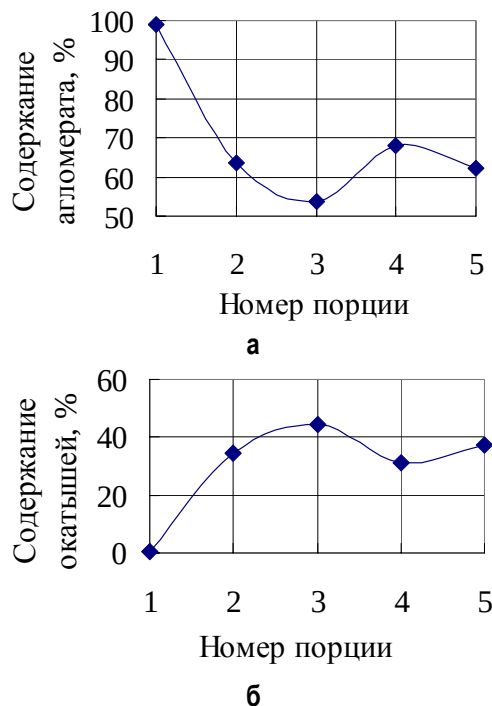


Рис. 2. Содержание агломерата (а) и окатышей (б) по мере истечения их из шихтового бункера в серии опытов № 1

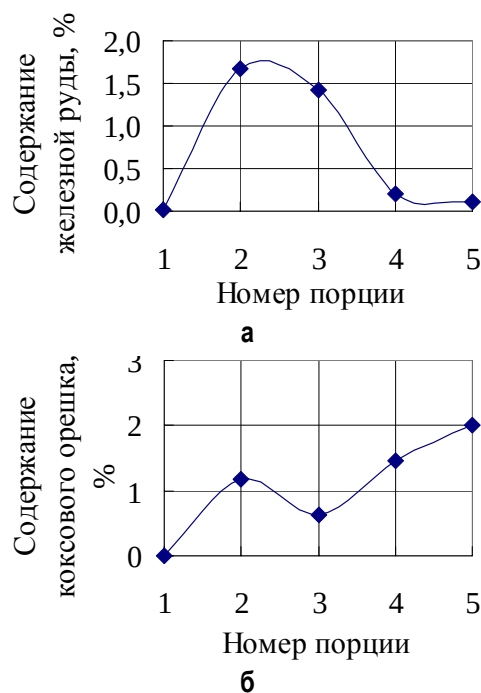


Рис. 3. Содержание железной руды (а) и коксового орезка (б) по мере истечения их из шихтового бункера в серии опытов № 1

Режим загрузки материалов «добавки наверх скипа» моделировали в серии опытов № 2. Последовательность расположения компонентов шихты была следующей: на дно бункера БЗУ помещали коксовый орешек, затем окатыши, следом руду и агломерат. Среднеквадратическое отклонение содержания материалов по порциям, отобранным по ходу выпуска в серии опытов № 2, составило 19,4% (см. **таблицу**), что выше аналогичной величины, полученной в серии опытов № 1. В серии опытов № 2 компоненты поступали на лоток БЗУ менее равномерно, на что указывают зависимости на **рис. 4, 5**.

Расположение окатышей в нижней части бункера БЗУ после небольшого количества коксового орезка обеспечило высокое их содержание (более 90%) в порции № 1. По ходу выпуска увеличивалась доля агломерата в каждой из порций и снижалась доля окатышей.

Применение на печи матрицы, предусматривающей движение лотка в направлении от периферии к центру при спиральном режиме загрузки материалов в условиях расположения нефлюсованных окатышей в нижней части бункера, может приводить к ускоренному износу футеровки печи или к ускоренной ликвидации ранее сформировавшейся настыли.

Поступление коксового орезка на лоток БЗУ

в начальный момент времени при использовании матрицы загрузки, предусматривающей начало высыпания порции материалов на станцию углового положения лотка № 11 или 10 и окончание на станции № 9, не обеспечит его расположения в рудном гребне.

Среднеквадратическое отклонение содержания компонентов сырья в порциях, отобранных по ходу выпуска

Последовательность расположения материалов в бункере БЗУ сверху вниз	Среднеквадратическое отклонение по видам материалов, %				
	агломерат	окатыши	руда	кокс- вый орешек	средне- ариф- мети- ческое значе- ние
– руда – окатыши – орешек – агломерат	17,4	17	1	0,8	9,1
– агломерат – руда – окатыши – орешек	37,5	36,9	0,6	2,7	19,4
– руда – орешек – окатыши 65% от их расхода – агломерат 75% от его расхода – окатыши 35% от их расхода – агломерат 25% от его расхода	9,4	9,8	1,1	1,2	5,4
– агломерат 83% от его расхода – руда – орешек – окатыши – агломерат 17%	13,9	13,5	0,6	0,7	7,2

В серии опытов № 3 исследовали режимы загрузки материалов в скип «вперемешку». Моделирование одного из них обеспечило следующее расположение их в бункере: на дне 25% агломерата от общего его расхода, затем 35% окатышей от общего их расхода, после чего оставшееся количество агломерата и окатышей. Последними в бункер поступали коксовый орешек и руда. Содержание компонентов сырья в порциях по ходу выпуска приведено на **рис. 6, 7**.

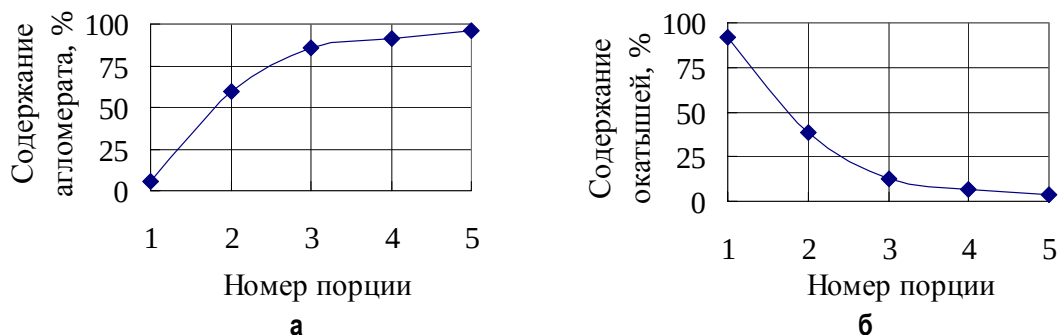


Рис. 4. Содержание агломерата (а) и окатышей (б) по мере истечения их из шихтового бункера в серии опытов № 2

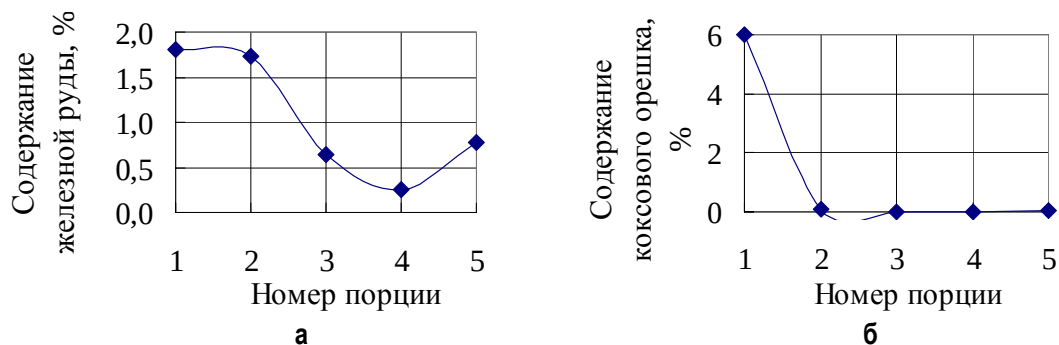


Рис. 5. Содержание железной руды (а) и коксового орешка (б) по мере истечения их из шихтового бункера в серии опытов № 2

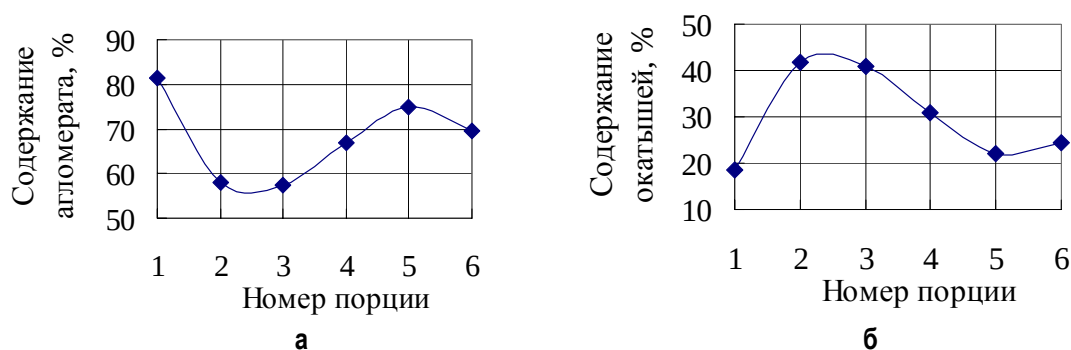


Рис. 6. Содержание агломерата (а) и окатышей (б) по мере истечения их из шихтового бункера в серии опытов № 3

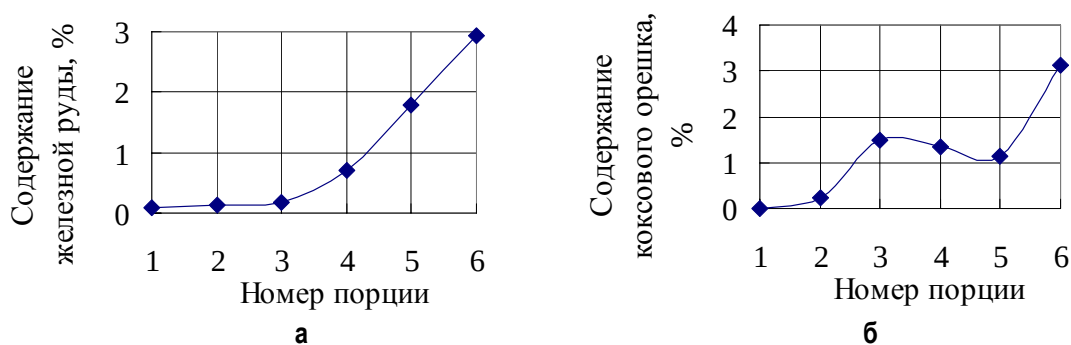


Рис. 7. Содержание железной руды (а) и коксового орешка (б) по мере истечения их из шихтового бункера в серии опытов № 3

Из анализа зависимостей, приведенных на рис. 6, 7, и данных, представленных в таблице, следует, что режим «вперемешку» обеспечивает более высокую равномерность поступления агломерата и окатышей из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи. Среднеквадратическое отклонение содержания агломерата и окатышей в порциях, отобранных по ходу выпуска, соответственно составили 9,4 и 9,8%.

Загрузка железной руды и коксового орешка в бункер последними не обеспечивает равномерное их поступление, что может отрицательно сказаться на дренажной способности кокса в горне печи. В этом случае предпочтительным будет использование следующей последовательности набора материалов в бункер БЗУ: на дно 17% агломерата от его расхода, затем окатыши, коксовый орешек, руда и оставшееся количество агломерата. Сформировать такой слой можно использованием модернизированного режима «добавки наверх скипа». Содержание агломерата и окатышей в порциях по ходу выпуска в серии опытов № 4, соответствующей такому режиму, приведено на рис 8, 9.

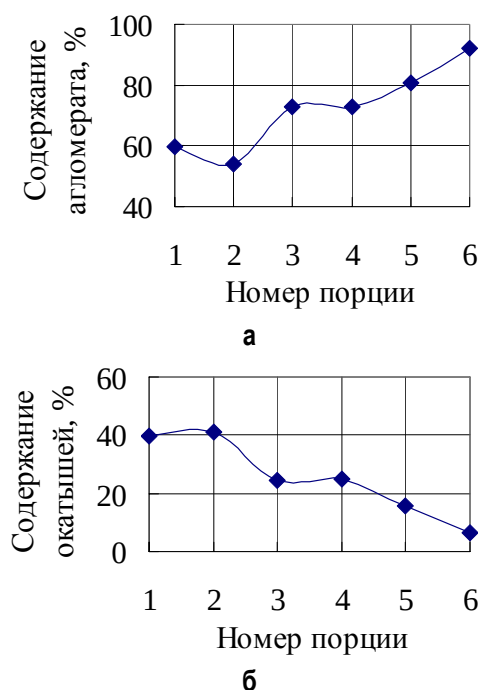


Рис. 8. Содержание агломерата (а) и окатышей (б) по мере истечения их из шихтового бункера в серии опытов № 4

Поскольку при проведении опытов было соблюдено равенство критерия Ньютона для печи и модели, то каждый один оборот вращения лотка на печи соответствует выпуску материалов в

двух последующих порциях модели. При использовании матрицы, предусматривающей спиральный режим загрузки сырьевых материалов на три станции углового положения лотка, использование режима, описанного в серии опытов №4, обеспечит повышенную равномерность распределения по видам в каждой из трех кольцевых зон колошника.

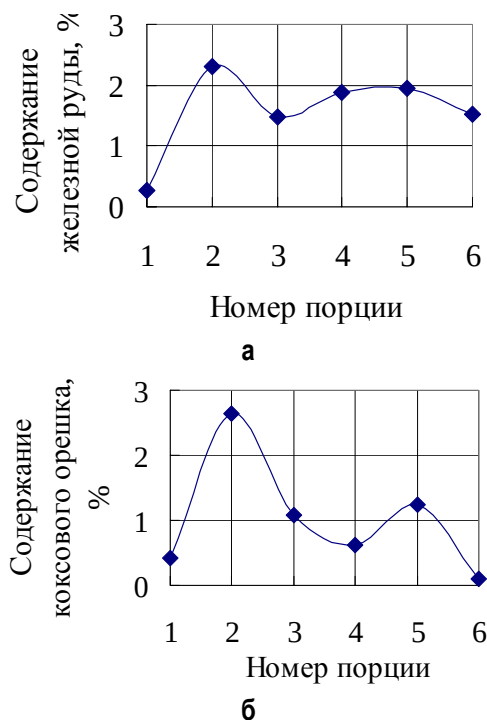


Рис. 9. Содержание железной руды (а) и коксового орешка (б) по мере истечения их из шихтового бункера в серии опытов № 4

Заключение

Физическим моделированием существующих режимов односкиповой загрузки материалов в бункер бесконусного загрузочного устройства лоткового типа на модели, изготовленной в масштабе 1:5 по отношению к реальному устройству, выявлена рациональная последовательность набора компонентов сырья в бункер при содержании в нём 30% окатышей. Низкую величину среднеквадратического отклонения содержания каждого из компонентов в порциях по ходу выпуска обеспечивала следующая последовательность расположения их в бункере: на дно 17% агломерата от его расхода, затем окатыши, коксовый орешек, руда и оставшееся количество агломерата. Такой режим целесообразен для улучшения использования энергии газов повышением равномерности распределения материалов по окружности колошника доменной печи.

Список литературы

1. Анализ особенностей формирования порций и истечения материалов из бункера БЗУ при загрузке шихты / Пыхтеева К.Б., Загайнов С.А., Тлеугабулов Б.С., Филиппов В.В., Журавлев Д.Л., Николаев Ф.П. // *Сталь*. 2008. № 6. С. 14–19.
2. Влияние различных факторов на равномерность распределения коксового орешка в колошниковом пространстве доменной печи, оснащенной БЗУ лоткового типа / А.С. Харченко, С.К. Сибгатуллин, Е.О. Теплых, Гущин Д.Н. // *Теория и технология металлургического производства: межрегион. сб. науч. трудов*. № 10. Магнитогорск, 2010. С. 33–38.
3. Сибгатуллин С.К. Оптимальная степень прямого восстановления железа из оксидов // *Сталь*. 1997. № 4. С. 1–5.
4. Mousa E., Senk D., Babich A. Reduction of Pellets-Nut Coke Mixture under Simulating Blast Furnace Conditions // *Steel Research International*. 2010. Vol. 81. Iss. 9. P. 706–715.
5. Mousa E., Senk D., Babich A. Einfluss von Brechkoks auf das Reduktionsverhalten von Eisenerzsinter / *Tagungsband zum 24. Aachener Stahlkolloquium Metallurgie, "Rohstoffe-Werkstoffe-Gesellschaft"*, 17-18.09.2009, Aachen. Aachen: Mainz, 2009. P. 67–77.
6. Влияние коксового орешка на фильтрацию жидких продуктов плавки в горне доменной печи / Сибгатуллин С.К., Харченко А.С., Чевычелов А.В. и др. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2010. № 4. С. 28–30.
7. Результаты совместного использования в доменной печи коксового орешка с одновременным улучшением качества скипового кокса / Сибгатуллин С.К., Харченко А.С., Полинов А.А. и др. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2010. № 2. С. 24–27.
8. Логические основы распознавания вида отклонения доменной плавки от нормального режима / Онорин О.П., Спирин Н.А., Павлов А.В., Лавров В.В. и др. // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 2014. № 8. С. 42–47.
9. Сибгатуллин С.К. Формирование слоя шихты в колошниковом пространстве доменной печи. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. 188 с.
10. Зависимость равномерности поступления агломерата и окатышей в колошниковое пространство печи от последовательности размещения их в бункере БЗУ / Сибгатуллин С.К., Теплых Е.О., Харченко А.С. и др. // *Теория и технология металлургического производства*. 2012. № 12. С. 16–21.
11. Воронцов В.В., Степанов А.Т. К вопросу о распределении шихтовых материалов по окружности колошника доменной печи // *Вестник Череповецкого государственного университета*. 2010. № 1. С. 129–133.
12. Предпусковые исследования загрузки и распределения шихты в доменной печи большого объема / Большаков В.И., Богачев Ю.А., Вишняков В.И. и др. // *Черная металлургия. Бюл. НТЭИ*. 2008. № 6. С. 14–19.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

IDENTIFICATION OF AN EFFICIENT SEQUENCE OF CHARGING COMPONENTS OF RAW MATERIALS INTO THE HOPPER OF THE BELL-LESS CHARGING DEVICE OF A CHUTE TYPE BY PHYSICAL MODELING

Sibgatullin Salavat Kamilovich – D.Sc. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7 (3519) 29 84 30. E-mail: 10skt@mail.ru.

Kharchenko Alexander Sergeevich – Ph.D. (Eng), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7 (3519) 29 84 30. E-mail: as.mgtu@mail.ru.

Abstract. Operating modes of the single-skip loading of raw material components into the charge hopper of the blast furnace at OJSC MMK were studied on a physical model of the bell-less charging device of a chute type. The authors examined the effect of changes in the sequence of a set of materials into the hopper on the uniformity of their loading in a throat area at a content of 30% of pellets in the iron ore part of the charge. It was found that in the current circumstances the most efficient sequence of materials charged into the hopper was the following: on the bottom 17% of sinter from its consumption, then pellets, coke nuts, ore and the remaining amount of sinter.

Keywords: Blast furnace, bell-less charging device of a chute type, charge, circumferential distribution, sinter, pellets, ore, coke nut.

References

1. Pykhteeva K.B., Zagaynov S.A., Tleugabulov B.S., Filippov V.V., Zhuravlev D.L., Nikolaev F.P. Analysis of the characteristics of forming portions and discharging materials from the hopper of the bell-less charging device when loading the charge. *Stal' [Steel]*. 2008, no. 6, pp. 14–19.
2. Kharchenko A.S., Sibgatullin S.K., Teplykh E.O., Gushchin D.N. The influence of the various factors on the uniformity of the coke nut distribution in the throat area of a blast furnace equipped with the bell-less charging device of a chute type. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva: mezhregional'nyj sbornik nauchnykh trudov № 10* [Theory and technology of metallurgical production. Interregional collection of scientific papers]. Magnitogorsk, 2010, no. 10, pp. 33–38.
3. Sibgatullin S.K. The optimum degree of the direct reduction of iron from oxides. *Stal' [Steel]*. 1997, no. 4, pp. 1–5.
4. Mousa E., Senk D., Babich A. Reduction of pellets-nut coke mixture under simulating blast furnace conditions. *Steel Research International*, 2010, vol. 81, iss. 9, pp. 706–715.
5. Mousa E., Senk D., Babich A. The effect of coke nut on the behavior of the reduction of iron ore by sinter. *Proceedings of the 24th Aachen Colloquium of steel metallurgy "Raw Materials Company"* 17-18.09.2009, Aachen. Aachen: Mainz, 2009, pp. 67–77.
6. Sibgatullin S.K., Kharchenko A.S., Chevychelov A.V. and others. The effect of coke nut on filtration of liquid products of melting in the blast furnace hearth. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2010, no. 4, pp. 28–30.
7. Sibgatullin S.K., Kharchenko A.S., Polinov A.A. and others. The results of the joint use of coke nut in the blast furnace while improving the quality of skip coke. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2010, no. 2, pp. 24–27.
8. Onorin O.P., Spirin N.A., Pavlov A.V., Lavrov V.V. and others. Logical framework of the recognition of the type of a deviation of the blast furnace smelting from a normal mode. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [News of the higher educational institutions. Ferrous metallurgy]. 2014, no. 8, pp. 42–47.

9. Sibagatullin S.K. *Formirovanie sloya shikhty v koloshnikovom prostranstve domennoj pechi* [The formation of the charge layer in the throat area of a blast furnace]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2014, 188 p.
10. Sibagatullin S.K., Teplykh E.O., Kharchenko A.S. and others. The dependence of the uniformity of charging sinter and pellets into the throat area of a blast furnace on the sequence of their placing in the hopper of the bell-less charging device. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva* [The theory and technology of steel production]. 2012, no. 12, pp. 16-21.
11. Vorontsov V.V., Stepanov A.T. On a distribution of the charge materials around the circumference of the throat of the blast furnace. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta* [Cherepovets State University Bulletin]. 2010, no. 1, pp. 129-133.
12. Bolshakov V.I., Bogachev Yu.A., Vishnyakov V.I. and others. Pre-start studies of charge loading and distribution in the blast furnace of a large volume. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' NTEI* [Ferrous metallurgy. Bulletin of NTEI]. 2008, no. 6, pp. 14-19.

Сибгатуллин С.К., Харченко А.С. Выявление рациональной последовательности набора компонентов сырья в бункер БЗУ лоткового типа физическим моделированием // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №3. С. 28–34.

Sibagatullin S.K., Kharchenko A.S. Identification of an efficient sequence of charging components of raw materials into the hopper of the bell-less charging device of a chute type by physical modeling. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 3, pp. 28–34.

УДК 662.81/84

ЭФФЕКТИВНЫЕ СПОСОБЫ ТУШЕНИЯ КОКСА

Пожидаев Ю.А., Столярова М.С., Бабинцев Я.В.

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

Аннотация. В работе рассмотрены способы тушения кокса, используемые установки, а также описаны особенности и недостатки каждого из них. Приведены критерии оценки эффективности тушения и проанализированы технологии изготовления кокса, что позволило выявить перспективные технологии с точки зрения экономической и экологической целесообразности.

Ключевые слова: кокс, способы тушения кокса, установка комбинированного тушения кокса с совмещением сортировки.

Введение

Коксохимическая промышленность (КХП) является одной из важнейших отраслей металлургии и обеспечивает коксом черную металлургию и ряд других отраслей промышленности, является источником разнообразных видов химического сырья, в том числе для углеграфитовых материалов и технического углерода. Путем коксования осуществляют химическую переработку каменных углей, в результате которой наряду с коксом получают высококалорийный коксовый газ, содержащий разнообразные химические продукты, являющиеся основным сырьем для многих химических производств, и особенно для продуктов органического синтеза. Цветная металлургия является потребителем малозольного пекового и связующего кокса, получаемого из каменноугольной смолы. Также к основным областям применения кокса относится выплавка чугуна (доменный кокс) – как высококачественное бездымное топливо, восстановитель железной руды, разрыхлитель шихтовых материалов. Доменный кокс должен иметь размеры кусков не менее 40 мм при ограниченном содержании кус-

ков менее 25 мм (не более 3 %) и не более 80 мм. Такие размеры кусков связаны с тем, что доменная печь является печью шахтного типа, в которой происходит противоток отходящих газов и шихтовых материалов. Если куски кокса менее требуемого размера, то они будут удаляться из печи вместе с отходящими газами. В литейном производстве кокс используют как топливо.

Классификация способов тушения кокса

Выданный из печи готовый кокс подвергается тушению, так как он находится в раскаленном состоянии (с температурой 950–1000°C). В настоящее время известны два способа тушения кокса: мокрое и сухое.

Мокрое тушение кокса

На большинстве заводов для тушения кокса применяют фенольные воды, в которых содержатся смолы, масла, аммиак, фенолы, сероводород, роданиды, цианиды и др. При этом происходит загрязнение атмосферы вредными веществами и резкое усиление коррозии коммуникации и оборудования [1].

Мокрое тушение заключается в заливке раскаленного кокса водой. На современных коксо-

химических заводах (КХЗ) процесс мокрого тушения полностью механизирован и производится следующим образом. Тушильный вагон с раскаленным коксом подводится с помощью электровагона под тушильную башню, достигающую высоты 30–40 м. Башня состоит из помещения для тушильного вагона и вытяжной трубы. На высоте нескольких метров от пола башни, под вытяжной трубой, подвешено оросительное устройство, состоящее из нескольких рядов горизонтально расположенных труб (диаметром 350–400 мм) с частыми отверстиями. Это устройство соединяется трубопроводом с напорным баком. Вода накачивается в напорный бак насосами. Поступление воды из напорного бака в оросительное устройство и работа насосов автоматизированы. При открывании запорного вентиля вода из напорного бака поступает в оросительное устройство, выбивается с большой силой через отверстия в трубах и падает на горячий кокс, осуществляя его тушение. Образующиеся водяные пары уходят через вытяжную трубу в атмосферу. Часть воды не успевает испариться и стекает из вагона на дно тушильной башни, а оттуда по открытым каналам отводится в шламовые отстойники.

Тушение кокса в тушильных башнях производится в течение 1–2 мин. Влажность кокса зависит как от работы машиниста тушильного вагона, так и от количества недопала (неготовый кокс) и состояния оросительного устройства. При нормальной работе влажность кокса не должна превышать 4–5%.

Испаряющаяся в процессе тушения вода пополняется свежей водой, поступающей в напорный бак из водопровода. Часто для тушения используются отходящие с химического завода сточные воды (фенольные). На тушение безвозвратно расходуется около 0,5–0,7 м³ воды на 1 т кокса.

После окончания процесса тушения состав тушильных вагонов выводится из-под башни и подается к рампе для разгрузки. Тушильный вагон имеет наклонное дно, благодаря чему при открывании боковой двери вагона кокс самостоятельно сползает на коксовую рампу в течение нескольких секунд.

Выше изложена наиболее часто применяемая схема тушения кокса мокрым способом. Также известен способ охлаждения кокса, осуществляемый прерывистым потоком воды. В этом способе изменение условий охлаждения обеспечивает сокращение величин температурных напряжений, но не решает проблему все же имеющего место термоудара при тушении кокса

водой, безвозвратной потери тепла выдаваемого из камер кокса и залповых выбросов вредных веществ в атмосферу [2].

Известен способ, согласно которому горячий кокс под действием силы тяжести проходит через первую ступень, где охлаждается путем косвенного теплообмена через стенки теплообменника и подается на вторую ступень, где охлаждается орошением водой, которую подают зонно при непрерывном перемешивании и принудительном перемещении в количестве, обеспечивающем ее испарение и достижение заданной температуры в каждой зоне [4].

Устройство для осуществления этого способа содержит верхнюю камеру шахтного типа с установленными внутри нее теплообменниками и соединенную посредством питателя с нижней камерой – установленным наклонно вращающимся барабаном, разделенным на теплообменные зоны, снабженным устройствами для перемешивания и перемещения кокса к разгрузочному торцу барабана и устройством для подачи воды в разные зоны барабана с регуляторами расхода воды.

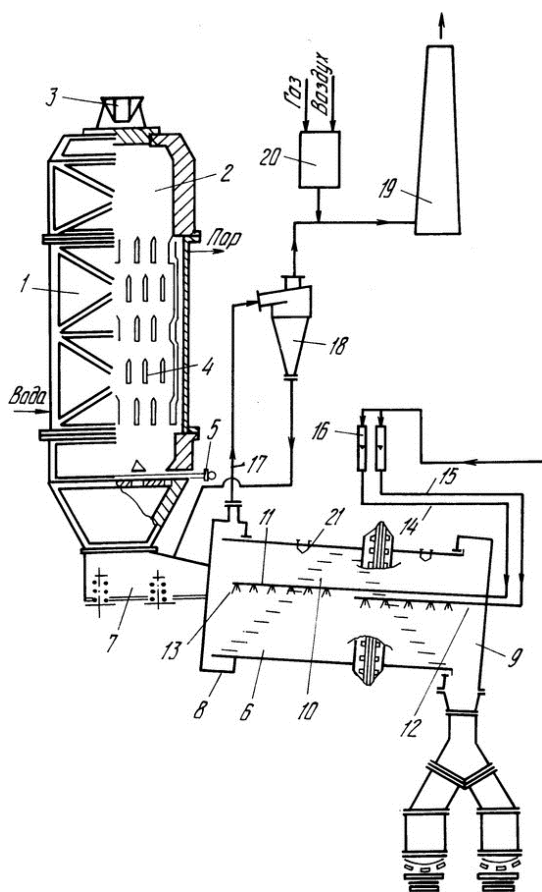
Для охлаждения кокса используют очищенные на биохимической установке фенольные воды коксохимического производства, техническую воду продувочного цикла оборотного водоснабжения или их смесь.

Также осуществляется газоотвод для выделяющегося в процессе охлаждения кокса пара системой аспирации и циклоном очистки пара от увлекаемой пыли. Парогазовую смесь после пылеочистки направляют в конденсатор-холодильник, а выходящие несконденсированные продукты – в топку дожига совместно с газом, выделяющимся из камеры охлаждения первой ступени, и затем сбрасывают в атмосферу через дымовую трубу.

Достоинства данного способа: утилизация тепла выдаваемого из печей кокса; «мягкие», без превышения температурных напряжений, условия охлаждения кокса во всем температурном диапазоне от 1000–1100 до 150–200°C, что обеспечивает достаточно высокие показатели качества кокса; отсутствие термоудара при использовании для охлаждения воды; отсутствие залповых выбросов вредных веществ в атмосферу (см. рисунок).

Недостатком этого способа является то, что в нем не учитывается различие времени охлаждения кусков разной крупности, что приводит к существенно большей влажности мелких классов, их налипанию на крупные куски и затруднению отделения от общей массы при сортировке.

ке кокса; различие времени удаления из внутренних объемов различных кусков кокса паров воды, используемой для их охлаждения (т.е. отпаровывания), что приводит к необходимости выдерживать кокс для этой цели на коксовой рампе; необходимость разделять кокс по классам крупности перед отправкой потребителям в отдельном крупногабаритном здании коксортировки с использованием большого количества транспортирующего и рассеивающего оборудования, а при необходимости обеспечить стабилизацию прочностных характеристик кокса (т.е. дозированное механическое воздействие на кокс) устанавливать в здании коксортировки дополнительные аппараты.



Устройство для осуществления тушения кокса

Общими недостатками мокрого тушения кокса является то, что тепло раскаленного кокса, составляющее 45–50% всего тепла, затраченного на коксование угля, безвозвратно теряется. Теряется также часть воды, подаваемой на тушение кокса, в результате ее испарения (0,5–0,6 м³/т валового кокса). Интенсивное охлаждение (от 1000±100°С до 150–200°С за 1,5–2,0 мин) за счет возникающих термических напряжений приво-

дит к образованию в кусках кокса трещин дополнительно к тем, которые образовались при коксовании. При этом значительно снижается прочность кокса. Однако этот способ тушения, несмотря на серьезные недостатки, во многих странах продолжает применяться, так как он прост по технологической оснастке и не требует больших капитальных затрат [6].

Сухое тушение кокса

Впервые способ сухого тушения кокса был осуществлен по предложению Г. Вундерлиха в 1917 г. фирмой «Sulzer» на коксогазовом заводе в г. Цюрихе (Швейцария). Делались попытки найти способ для перехода от мокрого тушения к сухому, например действие водяного пара в закрытой тушильной башне, и способ доктора Галера (фирма «Бамаг»), при котором кокс тушится в газотушильной камере горячей водой с образованием водяного газа. За прошедшие годы предложено и испытано большое число способов тушения кокса.

Впервые в России была построена установка сухого тушения кокса подземного типа на Керченском коксохимическом заводе (КХЗ) в 1936 г. Учитывая опыт работы Керченской установки сухого тушения кокса (УСТК) и ряда зарубежных установок, на Череповецком металлургическом заводе по проекту Гипрококса и Укрэноргосрмета в 1960 г. была построена опытно-промышленная УСТК производительностью 1000 т/сут. В течение 1963–1965 гг. на этом же заводе запущена в эксплуатацию промышленная УСТК в составе двух агрегатов (блоков). В 1966–1975 гг. были сооружены установки на Авдеевском КХЗ, Орско-Халиловском, Западносибирском, Новолипецком, Карагандинском металлургических заводах и Криворожском КХЗ.

Раскаленный кокс, выдаваемый из коксовой камеры, содержит большое количество тепла. В процессе тушения кокса за счет этого тепла образуется водяной пар, который не используется и уходит в атмосферу. Чтобы использовать это тепло, применяется сухое тушение кокса, которое заключается в следующем. Из тушильного вагона раскаленный кокс ссыпается в специальную кирпичную камеру, изолированную от проникновения в нее воздуха. Через эту камеру при помощи вентиляторов продуваются инертные газы, состоящие из углекислоты и азота, в атмосфере которых не происходит горения. Инертные газы проходят через раскаленный кокс и за счет его теплоты нагреваются до температуры 500–700°С, после чего прогоняются по системе газоходов парового котла. Омывая паровой котел, горячие газы отдают свое тепло для образо-

вания пара, идущего на нужды завода. При сухом тушении температура кокса постепенно снижается и охлажденный кокс выдается на рампу [3].

Рампа представляет собой наклонную площадку шириной 6–7 м, выстилаемую чугунными плитами. Назначение коксовой рампы состоит в следующем. Кокс, выгруженный из тушильного вагона, имеет температуру, достигающую 200–300°C. Транспортировать такой кокс ленточными резиновыми транспортерами нельзя, так как он будет их прожигать и приводить в негодность. Кроме того, свежепотушенный кокс содержит много поверхностной влаги, вследствие чего коксовый мусор прилипает к крупным кускам кокса и в дальнейшем плохо отсортировывается на коксортировке. Поэтому кокс вылеживается на коксовой рампе в течение 30–40 мин. За это время поверхностная влага кокса успевает испариться, а кокс успевает остыть до температуры, позволяющей его дальнейшее транспортирование [5].

Длина рампы зависит от количества обслуживаемых печей и обычно колеблется в пределах 50–70 м. Большое значение имеет угол наклона рампы. При крутом наклоне кокс скатывается книзу и не ложится равномерным слоем по поверхности рампы, что препятствует его охлаждению. При малом наклоне кокс плохо сходит с рампы, и приходится сталкивать его вниз вручную. Опытами установлено, что наиболее благоприятным является угол наклона 27–28 град. При этом кокс ложится по рампе равномерным слоем и легко сползает.

По нижней кромке рампы устанавливаются затворы, задерживающие кокс. Затворы изготавливаются из круглого или полосового железа и имеют вид установленной вертикально решетки. С помощью шарнирного устройства и контргрузов затворы могут поворачиваться и подниматься нижним концом вверх. При этом между нижним краем затвора и нижней кромкой рампы образуется щель, через которую кокс сползает с рампы и падает на установленный вдоль нее ленточный транспортер. Управление затворами ручное и производится с обслуживающей площадки, расположенной над транспортером вдоль рампы. Этим транспортером кокс по наклонному мосту доставляется на верхний этаж коксортировки [9].

Недостатком этого способа является то, что циркулирующий газ представляет собой смесь горючих и негорючих составляющих, которые при циркуляции через массу раскаленного кокса взаимодействуют с ним, что приводит к значи-

тельным потерям кокса – угару (более 3%), образованию избыточных газов, сброс которых вызывает загрязнение воздушного бассейна [10]. Горючие и токсичные компоненты газа затрудняют эксплуатацию УСТК. Транспортировка и сортировка кокса после УСТК создают проблемы по запыленности галерей и помещений. Требуются специальные мероприятия по фильтрации (обеспыливанию) воздуха.

Наиболее прогрессивным направлением по совершенствованию процесса тушения кокса является способ охлаждения, согласно которому кокс охлаждается в две ступени: на первой – водой через стенки теплообменника и на второй – охлаждающим газом, содержащим пары воды. Устройство для осуществления этого способа содержит шахту с пережимом в центральной части. Недостатком данного устройства является неравномерность охлаждения кокса из-за разной порозности кокса (доля межкусковых пустот в общем объеме слоя) в движущейся массе и большей скорости движения центральных участков, чем периферийных. Способ сложен ещё и потому, что газ второй ступени необходимо очищать от пыли. Эти способы также требуют сортировки кокса по классам крупности для формирования потребительских свойств перед отправкой [7].

Основные выводы по работе:

Выявлены основные факторы, влияющие на качество тушения технологическими средствами (водой, инертным газом):

- начальный размер фракций;
- равномерность приема кокса из камеры коксования в тушильный вагон и правильное его положение в вагоне;
- надежность устройств тушения кокса;
- продолжительность и равномерность тушения техническими средствами;
- качество технологических средств тушения;
- строгость выполнения технологических операций во временном интервале;
- уровень автоматизации комплекса тушения и сортировки с учетом человеческого фактора.

Таким образом, операция тушения кокса является важным звеном технологической цепочки, выполнение требований и норм которой будет оказывать влияние на качественные показатели кокса [8]. Для металлургии качественной оценкой кокса являются реакционная способность кокса (РСК), индекс реактивности (CRI), прочность остатка кокса после реакции с углеродом (CSR) и размер фракций, что в большей мере можно охарактеризовать его механической прочностью.

Совмещение операции тушения и сортировки кокса позволяет улучшить экологическую обстановку на предприятии и соответственно условия труда.

Заключение

Из анализа рассмотренных методов следует, что для улучшения качественных показателей кокса следует совместить процессы охлаждения кокса с его сортировкой по классам крупности.

Развитие методик конструирования технологических комплексов, осуществляющих совместное тушение и сортировку выданного из печи кокса, является актуальной проблемой для металлургии.

Список литературы:

1. Пожидаев Ю.А., Кадошников В.И., Савочкина Л.В. Проектирование демпфирующих систем для рекуперации энергии // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, 2011. №3. С. 80–83.
2. Мучник Д.А. Формирование свойств доменного кокса. М.: Металлургия, 1983. 182 с.
3. Справочник коксохимика. Т. 2. / под ред. А.К. Шелкова. М.: Металлургия, 1965. 288 с.
4. Пат. 2110552 РФ, МПК6 C10 B39/02. Способ охлаждения кокса и устройство для его осуществления / Бабанин В.И., Зайденберг М.А. Оpubл. 10.05.1998.
5. Угар кокса при транспортировании и сухом тушении / Степанов Ю.В., Беркутов Н.А., Сухоруков В.И. и др. // Кокс и химия. 1999. № 10. С. 11–16.
6. Сысков К. И., Королёв Ю. Г. Коксохимическое производство. М.: Высш. шк., 1969. 150 с.
7. Лейбович Р.Е. и др. Технология коксохимических производств. М.: Металлургия, 1982. 361 с.
8. Салов И.А., Пожидаев Ю.А. Способ определения механических характеристик хрупких материалов при дроблении // Механическое оборудование металлургических заводов. Вып. 3. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. С 102–105.
9. Сухое тушение кокса / Теплицкий М.Г. и др. М.: Металлургия, 1971. 264 с.
10. Петухов В.Н., Субботин В.В. Исследования физико-химических свойств бурых углей Маячинского месторождения республики Башкортостан и установление технологических режимов их обогащения // Теория и технология металлургического производства. 2011. № 11. С. 134–138.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

EFFICIENT COKE QUENCHING METHODS

Pozhidaev Yuri Aleksandrovich – Teaching Assistant, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: yoragan74@mail.ru.

Stolyarova Marina Sergeevna – student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: stolyarovsv1@rambler.ru.

Babintsev Yaroslav Vitalievich – student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Abstract. This paper focuses on coke quenching methods, applied plants, and describes their features and limitations. It contains performance assessment criteria of quenching and analyzes coke manufacturing techniques, revealing advanced technologies in terms of economic and environmental feasibility.

Keywords: Coke, coke quenching methods, combined coke quenching and screening plant.

References

1. Pozhidaev Yu.A., Kadoshnikov V.I., Savochkina L.V. Design of damping systems to recover energy. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University] 2011, no. 3, pp. 80-83.
2. Muchnik D.A. Formation of blast furnace coke properties. Moscow: Metallurgy, 1983, 182 p.
3. Reference book of coke chemical engineers. Vol. 2. Edited by A.K. Shelkova. Moscow: Metallurgy, 1965, 288 p.
4. Babanin V.I., Zaidenberg M.A. Patent of the Russian Federation 2110552, IPC6 C10 B39/02. Coke cooling method and facility. Published on 10.05.1998.
5. Stepanov Yu.V., Berkutov N.A., Sukhorukov V.I. et al. Coke burn-off loss in handling and dry quenching. *Coke and chemistry*, 1999, no. 10, pp. 11-16.
6. Syskov K.I., Korolev Yu.G. Coke and chemical by-products division. Moscow: Higher school, 1969, 150 p.
7. Leibovich R.E. et al. Technologies used in coke and chemical by-products division. Moscow: Metallurgy, 1982, 361 p.
8. Salov I.A., Pozhidaev Yu.A. A method used to determine mechanical properties of brittle materials during crushing. *Mechanical equipment of metallurgical plants*. Issue 3. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2014, pp. 102-105.
9. Teplitsky M.G. et al. Coke dry quenching. Moscow: Metallurgy, 1971, 264 p.
10. Petukhov V.N., Subbotin V.V. Studies of physical and chemical properties of brown coals of the Mayachinskoe deposit in the republic of Bashkortostan and determination of their beneficiation schedules. *Theory and technology of the metallurgical division*, 2011, no. 11, pp. 134-138.

Пожидаев Ю.А., Столярова М.С., Бабинцев Я.В. Эффективные способы тушения кокса // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №3. С. 34–38.

Pozhidaev Yu.A., Stolyarova M.S., Babintsev Ya.V. Efficient coke quenching methods. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 3, pp. 34–38.

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621.744.3: 536.495

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ОТЛИВОК

Колокольцев В.М., Сеницкий Е.В., Савинов А.С.

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

Аннотация. В работе рассмотрены вопросы расчета температурных полей в системе отливка – литейная форма для различных технологий литейного производства. Показано, что тепловые условия формирования отливок при кокильном литье и литье в песчано-глинистые формы оказывают существенное влияние на их механические, специальные и эксплуатационные свойства.

Ключевые слова: отливка, сплав, литейная форма, температура, теплоемкость, теплопроводность.

Введение

Повышение требований к специальным и эксплуатационным свойствам отливок приводит к необходимости повышения качества литых деталей. При этом для повышения свойств можно выделить три основных направления:

- разработка сплавов новых составов с заданными свойствами;
- изменение конструкции деталей и, как следствие, отливок;
- совершенствование технологии изготовления деталей (заготовок) из существующих сплавов.

Также следует отметить, что высокие эксплуатационные свойства достигаются при применении высоко- и комплексно-легированных сплавов. Подобные сплавы обладают высокой ценой, сложностью в производстве, специальными требованиями к технологическому и обрабатывающему оборудованию [1, 2].

При разработке сплавов новых составов с заданными свойствами и совершенствовании технологии изготовления деталей (заготовок) из существующих сплавов одним из сильнодействующих комплексов влияющих факторов являются условия кристаллизации и охлаждения отливок.

Основная часть

Основную роль в формировании отливки играют тепловые явления.

Значительная роль тепловых процессов объясняется широкими возможностями варьирова-

ния условий кристаллизации и охлаждения в современных технологических процессах получения отливок.

В практике литейного производства широко применялся закон квадратного корня. Это выражение для толщины ξ затвердевшего слоя в зависимости от времени τ имеет вид

$$\xi = k\sqrt{\tau}, \quad (1)$$

где k – константа затвердевания.

Величину k можно определить по следующему уравнению:

$$\frac{\lambda_1(t_{kp} - t_{1n})}{\sqrt{a_1} \operatorname{erf} \frac{k}{2\sqrt{a_1}}} e^{-\frac{k^2}{4a_1}} + \frac{\lambda'(t_{kp} - t_{1n})}{\sqrt{a'} \operatorname{erf} \frac{k}{2\sqrt{a'}}} e^{-\frac{k^2}{4a'}} =$$

$$= \frac{L\gamma' \sqrt{\pi}}{2} k, \quad (2)$$

где t_{kp} – температура кристаллизации металла; t_{1n} – температура поверхности отливки; λ – теплопроводность; a – температуропроводность; L – удельная теплота кристаллизации; γ – удельный вес. Индекс (1) относится к затвердевшему слою, индекс (') – к расплаву.

Величина k зависит от множества факторов, характеризующих процесс затвердевания. В практике литейного производства величину k определяют преимущественно опытным путем.

Для повышения точности описания тепловых условий Н.И. Хворинин на основе анализа количества теплоты, поступающей из отливки в форму, предложил следующую зависимость:

$$\xi = 1,158 \frac{b_{\phi}(t_{кр} - t_{\phi_нач})}{\gamma_1(\rho_1 + c_1' \Delta t_{пер})} \sqrt{\tau}, \quad (3)$$

где $b_{\phi} = \sqrt{\lambda_{\phi} \gamma_{\phi} c_{\phi}}$ – коэффициент аккумуляции теплоты для формы; c – удельная теплоемкость; $t_{\phi_нач}$ – начальная температура формы; $\Delta t_{пер}$ – перегрев металла, $\Delta t_{пер} = t_{зал} - t_{кр}$.

Он же предлагал рассчитывать процесс затвердевания отливок по формуле

$$\xi = k \sqrt{\tau} - \frac{c_1' \Delta t_{пер}}{\rho_1} R_1,$$

где $R_1 = V_1/F_1$ – приведенный размер отливки; V_1 – объем отливки; F_1 – площадь поверхности охлаждения отливки.

Недостатком приведенных уравнений является приближенный расчет без учета скрытой теплоты кристаллизации.

В настоящее время при разработке сплавов с заданными свойствами и оценки влияния условий формирования отливки применение указанных зависимостей не позволяет получить полное описание процессов кристаллизации и, как следствие, формирования фаз и их свойств [1].

В практике литейного производства можно

выделить несколько процессов с широким варьированием тепловых условий формирования отливок:

1. Получение отливок в песчаных формах с различными типами связующих.

1.1. Песчано-глинистые формы (сырые и сухие).

1.2. Процессы ХТС (холоднотвердеющие смеси).

1.3. Литье по газифицируемым моделям.

2. Литье в кокиль.

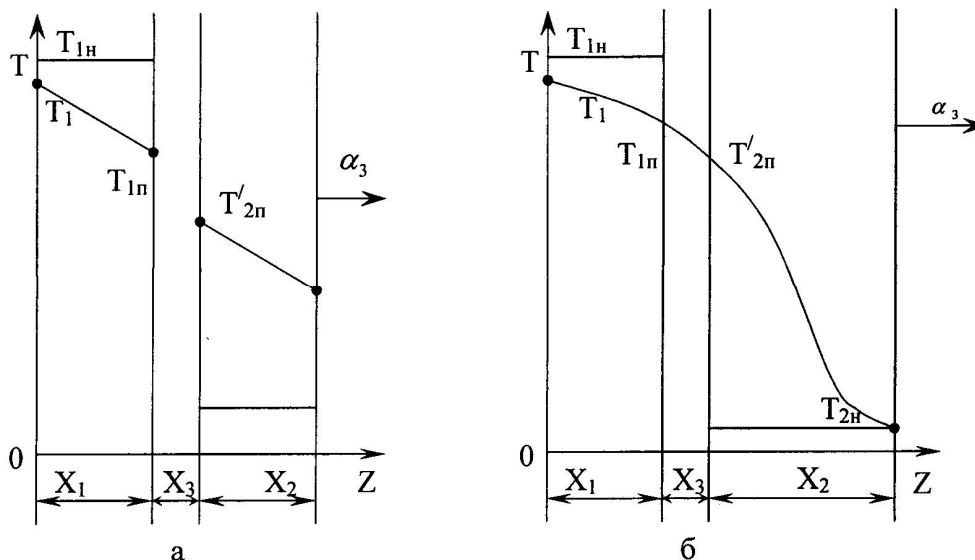
2.1. Массивный кокиль.

2.2. Тонкостенный кокиль.

2.3. Кокиль с принудительным охлаждением.

Наибольшими величинами скорости теплоотвода обладают процессы кокильного литья. Значительно более медленный теплоотвод наблюдается у процессов литья в сырые песчано-глинистые формы и еще более медленный у литья в сухих песчано-глинистых форм и ХТС.

Литье в кокиль. При литье в кокиль тепловые процессы играют основополагающую роль. Технология получения кокильного литья позволяет в широких диапазонах варьировать термические условия формирования отливок. Это обусловлено возможностью применения покрытий с различной толщиной и теплофизическими свойствами, возможностью управления режимами принудительного охлаждения формы [3, 4]. Особенностью широко применяемых технологий кокильного литья является тонкослойное покрытие $X_3/X_1 \ll 1$ (см. рисунок).



Температурных поля в системе отливка – тонкослойное покрытие – кокиль:
а – тонкостенный кокиль; б – массивный кокиль

Теплоаккумулирующая способность тонкослойного покрытия пренебрежимо мала, покрытие можно рассматривать как плоскую однослойную или многослойную стенку [5].

При этом изменение температуры потока металла в кокиле

$$\frac{\theta_1}{\theta_{зал.}} = \frac{T_1 - T_c}{T_{зал.} - T_c} = \exp \left[-A \left(t - \frac{Y}{U} \right) \right], \quad (4)$$

где T_c – температура среды; U – скорость движения металла; Y – координата.

$$A = \frac{\alpha_1 Y}{R_c S_1 C_1'}, \quad R_c = \frac{dV_1}{dF_1},$$

где R_c – приведенный размер струи; S_1, C_1' – плотность и удельная теплоемкость жидкого металла.

Из формулы (4) следует, что температура любого сечения струи уменьшается во времени по экспоненциальному закону. На стадии отвода теплоты перегрева расплава закон изменения температуры металла имеет вид

$$\frac{\theta_1}{\theta_{1н}} = \exp \left(\frac{F_1 \alpha_{1а}}{M_1 C_1'} t \right), \quad (5)$$

где $\theta_{1н}$ – начальная температура расплава; F_1 – площадь поверхности отливки; M_1 – масса отливки.

Если предположить, что $t = t_1$ (t_1 – продолжительность стадии заливки), то температуру $\theta_{1н}$ можно определить по формуле (4).

Из выражения (5) следует, что продолжительность стадии отвода теплоты перегрева составит

$$t_2 = \frac{M_1 C_1'}{F_1 \alpha_{1ф}} l_n \frac{\theta_{1н}}{\theta_{кр}}. \quad (6)$$

Интенсивность охлаждения на стадии затвердевания отливки определяется величиной критерия Био $B_{и1} = \frac{\alpha_1}{\lambda_1} X_1$ и ее геометрическими характеристиками.

При $B_{и1} \gg 1$ толщина твердого слоя для плоской стенки отливки

$$\xi = \sqrt{\frac{2\Pi(\Pi+1)\alpha_1}{L(\Pi+1)+1}} t, \quad (7)$$

а линейная скорость затвердевания

$$\frac{d\xi}{dt} = \frac{a_1 \Pi}{(L + \frac{1}{\Pi+1})\xi}. \quad (8)$$

После окончания затвердевания отливки температура металла продолжает уменьшаться, а температурное поле плоской отливки описывается выражением

$$\frac{\theta_1}{\theta_{кр}} = \left[1 - \frac{1}{1 + \frac{\Pi}{Bi_1}} \left(\frac{Z}{X_1} \right) \right] \exp \left[-\frac{F_0}{(\Pi+1)^{-1} + Bi_1^{-1}} \right], \quad (9)$$

где $F_0 = \frac{a_1 t}{X_1}$.

Степень влияния толщины стенки кокиля, толщины и теплофизических характеристик покрытий зависит от соотношений геометрических характеристик кокиля, покрытия, отливки и варьируется в широких пределах.

При получении отливок в сухих песчаных формах и ХТС тепловые процессы в системе отливка – литейная форма могут быть описаны аналогично процессам при кокильном литье.

Литье в сырые песчано-глинистые формы. Тепловые процессы, протекающие при получении отливок в сырых песчано-глинистых формах, осложняются процессами возгонки-конденсации влаги формовочной смеси, что требует дополнительного описания [6, 7].

Сырая песчано-глинистая смесь наиболее часто применяется в условиях литейного производства и является наиболее сложной для расчетов, так как необходимо учесть влияние максимального числа факторов [6].

Тепловой баланс i -го элементарного объема формы запишется как

$$Q^i - (Q_{см}^i + Q_{воды}^i + Q_{исп}^i) = 0, \quad (10)$$

где $Q_{см}^i$ – тепло, затраченное на прогрев слоя смеси, Дж/кг_{смеси}; $Q_{воды}^i$ – тепло, затраченное на нагрев воды, содержащейся в 1 кг смеси, Дж/кг_{смеси}; $Q_{исп}^i$ – тепло, затраченное на парообразование влаги в 1 кг смеси, Дж/кг_{смеси}.

Для расчета тепла, затраченного на нагрев формы, требуется найти значение удельной тепло-

емкости для каждого из слагаемых выражения (10).

Температурное изменение теплоемкости в процессе нагрева сухого слоя смеси в первом приближении можно выразить через удельную теплоемкость основного компонента ПГФ – оксида кремния SiO_2 по следующей формуле [7]:

$$C_{\text{SiO}_2} = 925,5 + 184,33T_i^n \cdot 10^{-3}, \quad (11)$$

где C_{SiO_2} – удельная теплоемкость оксида кремния, Дж/кгК.

Значение теплоемкости рассчитанное по выражению (11) используется при расчете теплового поля сухих ПГФ.

При расчете температурного поля сырой ПГФ требуется учет теплоты парообразования при высушивании слоя смеси под воздействием теплового потока отливки. Этот учет осуществим за счет изменения в сторону увеличения теплоемкости формы на температурном интервале $(T_{\text{исп}} - T_0)$ таким образом, чтобы выполнялось условие теплового баланса, отнесенное на 1 кг смеси [7]:

$$\int_{T_0}^{T_{\text{исп}}} C_{\text{доб}(2)} dT = L \frac{U_0}{100}, \quad (12)$$

где $(T_{\text{исп}} - T_0)$ – температурный интервал полного испарения влаги в слое формы, К; $C_{\text{доб}(2)}$ – добавочное значение теплоемкости, компенсирующее теплопоглощение при парообразовании и нагреве начальной влажности смеси на температурном отрезке $(T_{\text{исп}} - T_0)$, Дж/кг $\cdot$ К; $T_{\text{исп}}$ – температура полного испарения влаги в i -м слое смеси, $T_{\text{исп}} = 373$ К; U_0 – начальная влажность

формы, %; L – теплота парообразования воды, $L = 2,26 \cdot 10^6$ Дж/кг.

Таким образом, эквивалентная объемная теплоемкость $C_{\text{экв}(2)}$ слоя формы с учетом затрат тепла на нагрев и парообразование влаги в i -м слое смеси может быть отобрана следующей зависимостью:

$$C_{\text{экв}(2)} = \rho_{\text{сух}} C_{\text{SiO}_2} + \rho_{\text{формы}} C_{\text{доб}(2)}, \quad (13)$$

где $C_{\text{экв}(2)}$ – эквивалентная теплоемкость, Дж/м³К; $\rho_{\text{формы}}, \rho_{\text{сух}}$ – плотность формы и сухого слоя смеси формы при полном испарении влажности, кг/м³.

В первом приближении вид функции распределения добавочной теплоемкости $C_{\text{доб}(2)}$ по толщине единичного пространственного интервала незначительно влияет на конечный результат расчета [7]. Однако выбранная функция должна учитывать распределение добавочной теплоемкости так, чтобы ее значение в точке полного испарения влажности $T_{\text{исп}}$ было равно нулю. Исходя из этого условия, в качестве функции распределения было выбрано следующее выражение [6]:

$$y = 1 - th^a \left(\frac{x}{2} \right). \quad (14)$$

Адаптируя данную функцию к требуемым условиям, было получено выражение добавочной теплоемкости $C_{\text{доб}(2)}$ [7].

$$C_{\text{доб}2} = K \left(1 - th^{U_0^{0,672} \exp(2,87 \cdot 10^{-3} U_0^2 + 29,428 \cdot 10^{-2} U_0 - 1,849)} \left(\frac{T_i^n - T_0}{19,306 - 0,046 U_0 \ln(U_0) - 2,5022 \ln(U_0)} \right) \right) \times \\ \times \frac{61800}{9,653 - 0,023 U_0 \ln(U_0) - 1,2511 \ln(U_0)}, \quad 2 \leq U_0 \leq 14, \quad (15)$$

где K – поправочный коэффициент ($K=0,98$).

Учитывая вышеизложенное, выражение эквивалентной теплоемкости запишется как:

$$C_{\text{экв}(2)} = (952,5 + 184,33 \cdot T_i^n \cdot 10^{-3}) \rho_{\text{сух}} + \\ + K \left(1 - th^{U_0^{0,672} \exp(2,87 \cdot 10^{-3} U_0^2 + 29,428 \cdot 10^{-2} U_0 - 1,849)} \left(\frac{T_i^n - T_0}{19,306 - 0,046 U_0 \ln(U_0) - 2,5022 \ln(U_0)} \right) \right) \times \\ \times \frac{61800 \rho_{\text{формы}}}{9,653 - 0,023 U_0 \ln(U_0) - 1,2511 \ln(U_0)}, \quad 2 \leq U_0 \leq 14. \quad (16)$$

Данное выражение позволяет учесть изменение теплоемкости песчано-глинистой смеси в ходе ее нагрева, а также тепло, затраченное на нагрев и парообразование влаги в сырой песчано-глинистой литейной форме.

Заключение

Применение методов математического моделирования тепловых процессов для условий литейного производства позволяет сократить издержки при создании и внедрении в производство сплавов новых составов с заданными свойствами. Управление тепловыми условиями формирования отливки применительно к технологическим процессам позволяет получать заданную макро- и микроструктуру литого сплава, что, в свою очередь, формирует механические, специальные и эксплуатационные свойства отливок.

Список литературы

1. Колокольцев В.М., Гольцов А.С., Синицкий Е.В. Влияние первичной литой структуры жароизносостойких железоуглеродистых сплавов на их коррозионную стойкость // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И.Носова. 2011. №2 (34). С. 18–23.
2. Комплексно-легированные белые чугуны функционального назначения в литом и термообработанном состояниях / Ри Э.Х., Колокольцев В.М., Ри Х., Петроченко Е.В., Воронков Б.В. Владивосток, 2006.
3. Вейник А.И. Теория затвердевания отливки. М.: Машгиз, 1960. 435 с.
4. Вейник А.И. Приближенный расчет процесса теплопроводности. Л.: Госэнергоиздат, 1959. 184 с.
5. Анисович Г.А., Жмакин А.П. Охлаждение отливки в комбинированной форме. М.: Машиностроение, 1969. 136 с.
6. Савинов А.С., Тубольцева А.С., Варламова Д.В. Расчет теплового поля сырой песчано-глинистой формы // Черные металлы. 2011. С. 36–38.
7. Определение теплоемкости формовочной смеси при расчете теплового поля сырой песчано-глинистой формы/ Савинов А.С., Тубольцева А.С., Радомская В.В. и др. // Современная металлургия начала нового тысячелетия: сб. науч. тр. Ч. I. Липецк: ЛГТУ, 2010. С. 32–36.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

MODELLING OF TEMPERATURE FIELDS WHEN PRODUCING CASTINGS

Kolokoltsev Valery Mikhailovich – D.Sc. (Eng.), Professor, Rector of Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Sinitskiy Yevgeniy Valerievich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7 (3519) 29-85-30. E-mail: e-v-s@mail.ru.

Savinov Alexander Sergeevich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Head of the Theoretical Mechanics and Mechanics of Materials Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7 (3519) 29-85-18. E-mail: Savinov_nis@mail.ru.

Abstract. The paper deals with the calculation of the temperature fields in the casting - mold for different foundry technologies. It is shown that the thermal conditions of the formation of castings in chill casting and sand mold casting have a significant impact on their mechanical, special and performance characteristics.

Keywords: Casting, alloy, casting mold, temperature, thermal capacity, thermal conductivity.

References

1. Kolokoltsev V.M., Goltsov A.S., Sinitskiy E.V. The influence of the primary cast structure of heat- and wear-resistant iron-carbon alloys on their corrosion resistance. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2011, no. 2 (34), pp. 18-23.
2. Kompleksno-legirovannye belye chuguny funktsional'nogo naznacheniya v litom i termoobrabotannom sostoyaniyakh / Ri Eh.Kh., Kolokol'tsev V.M., Ri Kh., Petrochenko E.V., Voronkov B.V. Vladivostok, 2006.

3. Veinik A.I. *Teoriya zatverdevaniya otlivki* [The theory of solidification]. Moscow: Mashgiz, 1960, 435 p.
4. Veinik A.I. *Priblizhennyj raschet protsesssa teploprovodnosti* [An approximate calculation of the thermal conductivity]. Leningrad: Gosenergoizdat, 1959, 184 p.
5. Anisovich G.A., Zhmakin A.P. *Okhlazhdenie otlivki v kombinirovannoj forme* [Cooling castings in a combined mold]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1969, 136 p.
6. Savinov A.S., Tuboltseva A.S., Varlamova D.V. Temperature pattern calculation for the green-sand mold. *Chernye metally* [Ferrous metals]. 2011, pp. 36-38.
7. Savinov A.S., Tuboltseva A.S., Radomskaya V.V. et al. Determination of molding sand mixture thermal capacity at temperature pattern calculation for the green-sand mold. *Sovremennaya metallurgiya nachala novogo tysyacheletiya: sbornik nauchnykh trudov Chast' I* [Modern metallurgy at the beginning of the new millennium: Collection of scientific papers. Part I]. Lipetsk: LSTU, 2010, pp. 32-36.

Колокольцев В.М., Синицкий Е.В., Савинов А.С. Моделирование температурных полей при получении отливок // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №3. С. 39–43.

Kolokoltsev V.M., Sinitskiy Ye.V., Savinov A.S. Modelling of temperature fields when producing castings. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 3, pp. 39–43.

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.777: 621.777.22

АНАЛИЗ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ УСЛОВИЙ НЕПРЕРЫВНОГО ПРЕССОВАНИЯ МЕТОДОМ CONFORM

Беляев С.В.¹, Богданов Д.В.¹, Губанов И.Ю.¹, Горохов Ю.В.¹,
Крохин А.Ю.², Фролов В.Ф.², Костин И.В.¹

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

² ООО «РУСАЛ ИТЦ», Красноярск, Россия

Аннотация. Представлены аналитические зависимости расчета энергосиловых условий непрерывного прессования методом conform и проведен анализ влияния конструктивных параметров инструмента и технологических условий деформирования на энергосиловые показатели процесса conform. Впервые в статье для определения усилия прессования учитывались параметры очага деформации и реология деформируемого металла. С применением полученных зависимостей был разработан алгоритм расчета изменения энергосиловых условий непрерывного прессования методом conform, реализованный в программе Microsoft Excel, которая позволяет при дискретном вводе исходных данных определять энергосиловые условия во время прессования. Применение полученного решения на практике не требует специальной подготовки инженерно-технического персонала, делает возможным проведение анализа влияния основных параметров процесса на изменение энергосиловых условий непрерывного прессования методом conform для разработки оптимальной технологии производства профилей или создания АСУ ТП.

Ключевые слова: непрерывное прессование методом conform, анализ энергосиловых условий деформирования.

Введение

При разработке технологии, оборудования, проектировании инструмента для совмещенного процесса литья и непрерывного прессования методом conform, как и для любого другого вида ОМД, актуально проведение анализа энергосиловых условий процесса conform с целью создания математических моделей для расчета данных параметров с учетом особенностей формоизменения процесса и реологических свойств деформируемого металла.

В обобщающей работе [1] представлены современные представления теоретических и технологических основ расчета и моделирования температурно-скоростных и энергосиловых условий непрерывного прессования методом conform и совмещенного процесса литья и прессования цветных металлов и сплавов. Однако не учитывается протяженность зон деформации в башмаке, что снижает точность расчетов.

Методика определения энергосиловых условий непрерывного прессования методом conform

Во время деформирования металла методом conform, которое происходит в области ограниченной длиной башмака и его упором, перекрывающим в поперечном сечении кольцевую канавку карусельного кристаллизатора, объем деформируемого металла условно можно разбить на три характерные области (рис. 1):

1) входная область протяженностью L_{BX} от входа в башмак и до конца участка наклонной поверхности башмака под углом α_B , где деформируемый металл полностью заполняет поперечное сечение и вступает в полный контакт со стенками канавки карусельного кристаллизатора и башмака – происходит распрессовка заготовки с уменьшением ее высоты до h_K .

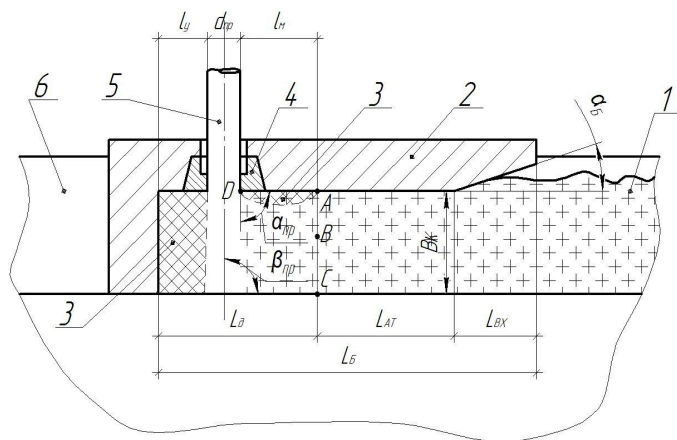
В данной области напряжение σ_φ , возникающее в поперечном сечении деформируемого металла, будет равно

$$\sigma_\varphi = \bar{\sigma}_s \left[\mu_A \left(\frac{2R}{b} + 1 \right) + \frac{\mu_A \cos \alpha_B - \mu_P}{h_K \cos \alpha_B} \left(R + \frac{b}{2} \right) \right] \varphi + \sigma_{s0}, \quad (1)$$

где $0 < \varphi < \varphi_{BX} = \frac{L_{BX}}{R_K + b_K/2}$ – центральный угол входной области; $\overline{\sigma}_S = \sqrt{\sigma_{S0} \cdot \sigma_{SK}}$ – среднее сопротивление деформации во входной области; $\sigma_{S0} \approx \sigma_{0,2}$ – условный предел текучести металла на входе в башмак;

2) область основного активного трения протяженностью L_{AT} от конца участка наклонной поверхности башмака до поперечного сечения входа в очаг деформации, где в результате взаимодействия деформируемого металла с приводным вращающимся карусельным кристаллизатором в конце данной области создается напряжение σ_ϕ в поперечном сечении на входе в очаг деформации, необходимое для последующего выдавливания деформируемого металла через калибрующее отверстие матрицы;

3) очаг деформации (ОД) протяженностью L_D от поперечного сечения, где напряжение σ_ϕ достигло величины, достаточной для осуществления прессования и до поперечного сечения выхода профиля из рабочего канала матрицы.



где $\tau_A = \mu_A \sigma_S$ – активные напряжения трения, действующие на границе контакта кольцевой канавки вращающегося карусельного кристаллизатора и деформируемого металла; $\tau_P = \mu_P \sigma_S$ – реактивные напряжения трения, действующие на границе контакта неподвижного башмака и деформируемого металла; μ_A и μ_P – коэффициенты трения.

После некоторых преобразований получим:

$$d\sigma = \sigma_S \left(\frac{2\mu_A}{b_K} + \frac{\mu_A - \mu_P}{h_K} \right) \cdot \left(R_K + \frac{b_K}{2} \right) d\varphi. \quad (5)$$

Данное уравнение позволяет оценить изменение напряжений в области основного активного трения и, приравнявая $\sigma_\phi = \sigma_{PP}$, найти протяженность данной области $L_{AT} = (R_K + b_K/2) \varphi_{AT}$:

$$\varphi_{AT} = \frac{\frac{\sigma_{PP}}{\sigma_{SAT}} - \left[\frac{2\mu_A}{b_K} + \frac{\mu_A \cos \alpha_B - \mu_P}{h_K \cos \alpha_B} \right] \varphi_{BX}}{\frac{2\mu_A}{b_K} + \frac{\mu_A - \mu_P}{h_K}}. \quad (6)$$

Учитывая, что на практике $\mu_A \approx \mu_P$, то выражение (6) можно упростить:

$$\varphi_{AT} = \frac{\sigma_{PP} b_K}{2\mu_A \sigma_S} - \left[1 - \frac{b_K (1 - \cos \alpha_B)}{2h_K \cos \alpha_B} \right] \varphi_{BX}, \quad (7)$$

где $\sigma_{PPM} = \frac{P_{PP} + P_M}{b_K h_K}$ – давление, необходимое

для выдавливания прутка из рабочего канала матрицы; P_{PP} и P_M – силы прессования и трения на рабочем пояске матрицы.

Из известных опубликованных исследований силовых условий прессования наиболее обоснованной является инженерная формула Л.А. Шофмана [3]:

– для прямого (горизонтального $\beta_{PP} = 0^\circ$) прессования

$$\sigma_{PP} = \sigma_S (0,8 + 1,2 \ln \lambda_{PP}); \quad (8)$$

– для бокового ($\beta_{PP} = 90^\circ$) прессования

$$\sigma_{PP} = \sigma_S (0,8 + 1,45 \ln \lambda_{PP}), \quad (9)$$

где λ_{PP} – вытяжка при прессовании.

Из формул (8) и (9) видно, что при увеличении угла β_{PP} от 0 до 90° давление прессования σ_{PP} увеличивается на 0,25. Поэтому можно предложить следующую формулу для оценки давления при угловом прессовании:

$$\sigma_{PP} = \sigma_S \left[0,8 + \left(1,2 + \frac{\beta_{PP}}{360^\circ} \right) \ln \lambda_{PP} \right]. \quad (10)$$

Протяженность очага пластической деформации L_D при выдавливании в канал матрицы обусловлена действием активных сил трения на деформируемый металл. Угол образующей упругой зоны α_{PP} будет больше, чем при обычном прямом прессовании, что показано применительно к СПАТ в работе [4]: $\alpha_{PP} = 65 \div 70^\circ$, а в работе [5] α_{PP} определен для процесса conform из условия минимума мощности деформации и составил $\alpha_{PP} = 70^\circ$. Экспериментальное обоснование таких значений углов α_{PP} дано в монографии [6]. Поэтому для горизонтального выдавливания принимаем значение угла $\alpha_{PP} = 70^\circ$.

В своих работах И.Л. Перлин [4], М.З. Ерманок [7] указывали на то, что ОД при прессовании имеет довольно сложную форму, которая, как и размеры, зависит от множества факторов и не поддается точному математическому описанию. Понятие границы ОД в значительной степени условно, так как построить какую-то поверхность (в плоскости чертежа – линию), строго отделяющую зону пластического течения от зоны, находящейся преимущественно в упругом состоянии, невозможно. Особенно это касается задних и передних границ ОД. Вследствие невозможности их теоретического построения сделаем гипотетическое предположение, что при горизонтальном выдавливании $\beta_{PP} = 0^\circ$ через одноканальную матрицу из прямоугольного калибра сечением $F_K = b_K h_K$ ОД представляет собой усеченный конус. При угле конусности матрицы $\alpha_M \geq 70^\circ$ (в том числе и для плоской матрицы) расчетный угол конуса принимается равным $\alpha_{PP} = 70^\circ$, а при $\alpha_M \leq 70^\circ$ – равным действительному $\alpha_{PP} = \alpha_M$ (рис. 2).

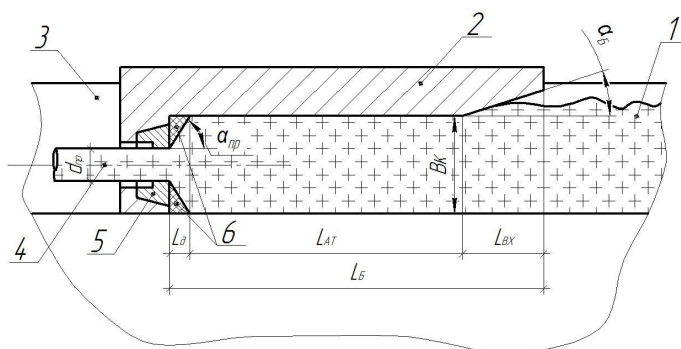


Рис. 2. Расчетная схема для горизонтального прессования ($\beta_{пр} = 0^\circ$) методом conform:

- 1 – заготовка; 2 – башмак с заходным углом α_b ;
3 – канавка карусельного кристаллизатора; 4 – прутки;
5 – матрица; 6 – «мертвые» зоны в объеме деформируемого металла перед матрицей

Тогда протяженность ОД будет равна

$$L_d = \frac{D_k - d_{пр}}{2 \cdot \operatorname{tg} \alpha_{пр}}, \quad (11)$$

где $D_k = \sqrt{\frac{4F_k}{\pi}}$ – приведенный диаметр;

$F_k = b_k h_k$ – площадь поперечного сечения канавки карусельного кристаллизатора, ограниченного башмаком, перед очагом деформации; $d_{пр}$ – диаметр прутка.

При вертикальном (угловом) выдавливании $\beta_{пр} = 90^\circ$ через одноканальную матрицу из прямоугольного калибра сечением $F_k = b_k h_k$ ОД будет иметь более сложную форму (см. рис. 1). В работе предложено [1] в первом приближении протяженность ОД при угловом прессовании рассчитывать как

$$L_d = l_v + d_{пр} + l_m, \quad (12)$$

где $l_m = 0,382 b_k \operatorname{tg} \alpha_{пр}$, т.е. точка B делит отрезок AB по правилу золотого сечения.

Зная геометрические размеры очага деформации, можно найти его объем $V_{од}$ и такие параметры деформации, как:

$$t_d = \frac{V_{од}}{b_k h_k \omega_k (R_k + b_k/2)} - \text{время деформации; } (13)$$

$$\varepsilon_d = \ln \lambda_{пр} = \ln \left(\frac{\pi d_{пр}^2}{4 b_k h_k} \right) - \text{степень деформации; } (14)$$

$$\xi_d = \frac{\varepsilon_d}{t_d} - \text{скорость деформации. } (15)$$

Далее, если известно уравнение реологии деформируемого металла, то с помощью параметров (13)–(15) можно рассчитать сопротивление деформации σ_s деформируемого металла и определить такие важные энергосиловые параметры совмещенного процесса литья и непрерывного прессования методом conform, как усилие прижима башмака $P_{прб}$ к карусельному кристаллизатору и мощность привода установки N_{vc} .

При проектировании технологии совмещенного процесса литья и непрерывного прессования методом conform важно правильно выбрать усилие прижима башмака к карусельному кристаллизатору. При недостаточном усилии прижима деформируемый металл начнет вытекать в зазоры между башмаком и карусельным кристаллизатором, а при чрезмерном усилии прижима возможен повышенный абразивный износ инструмента, заклинивание и выход его из строя. Для оценки усилия прижима башмака к карусельному кристаллизатору воспользуемся выражением (5)

$$P_{прб} = \overline{\sigma}_{спр} b_k \left(R_k + \frac{b_k}{2} \right) (\varphi_{ат} + \varphi_{вх}) \times \left[\left(\frac{2\mu_A}{b_k} + \frac{\mu_A - \mu_p}{h_k} \right) \cdot \left(R_k + \frac{b_k}{2} \right) (\varphi_{ат} + \varphi_{вх}) + 1 \right]. \quad (16)$$

При равенстве коэффициентов трения на поверхности контакта башмака и канавки карусельного кристаллизатора – $\mu_A = \mu_p$ и μ_p выражение (16) примет следующий вид:

$$P_{прб} = \overline{\sigma}_{спр} b_k \left(R_k + \frac{b_k}{2} \right) (\varphi_{ат} + \varphi_{вх}) \times \left[\left(\frac{2\mu_A}{b_k} \right) \cdot \left(R_k + \frac{b_k}{2} \right) (\varphi_{ат} + \varphi_{вх}) + 1 \right], \quad (17)$$

где $\overline{\sigma}_{спр} = \sqrt{\sigma_{s0} \cdot \sigma_{sk}}$, σ_{s0} и σ_{sk} – сопротивления деформации в начале и конце области деформации.

Мощность привода установки N_{vc} , затрачиваемая на реализацию процесса conform, будет равна

$$N_{YC} = M_{PP} \omega_K = \left(R_K + \frac{b_K}{2} \right) \omega_K \sum_{i=1}^n P_i, \quad (18)$$

где $\sum_{i=1}^n P_i = P_{TPB} + P_{PP} + P_M + P_{OD} + P_{TPY}$ – сумма сил трения на башмаке P_{TPB} , на наружной поверхности очага деформации P_{OD} , на контакте упора башмака и канавки карусельного кристаллизатора P_{TPY} , на рабочем пояске матрицы P_M и силы прессования P_{PP} :

$$P_{TPB} = \mu_B \overline{\sigma_{SBX}} b_K \left(R_K + \frac{b_K}{2} \right) (\varphi_{AT} + \varphi_{BX}), \quad (19)$$

$$P_{PP} = b_K h_K \overline{\sigma_{SPP}} \left[0,8 + \left(1,2 + \frac{\beta_{PP}}{360^0} \right) \ln \lambda_{PP} \right], \quad (20)$$

$$P_M = \mu_M \overline{\sigma_{SM}} F_M, \quad (21)$$

$$P_{OD} = \mu_B \overline{\sigma_{SPP}} \times \left[R_K (2h_K + b_K) + b_K h_K \left(1 + \frac{b_K}{2h_K} \right) \right] \varphi_{OD}, \quad (22)$$

$$P_{TPY} = \mu_B \overline{\sigma_{SPP}} l_{BY} (2h_K + b_K), \quad (23)$$

где $\overline{\sigma_i}$ – среднее значение сопротивления деформации в i -й зоне; F_M – боковая поверхность рабочего пояса матрицы; μ_i – коэффициент трения i -й зоне; l_{BY} – толщина упора башмака.

Полученные выражения вполне приемлемы для инженерных расчетов и позволяют провести анализ энергосиловых условий непрерывного прессования методом conform для следующих значениях параметров:

– радиус удаления кольцевой канавки от оси вращения карусельного кристаллизатора изменялся в пределах $R_K = 100 - 300$ мм;

– высота и ширина кольцевой канавки были равны $h_K = b_K = 10$ мм;

– коэффициенты трения принимались равными $\mu_A = \mu_P = 0,5$;

– коэффициент вытяжки изменялся в пределах $\lambda_{PP} = 2 - 12$;

– заготовка из свинца непрерывно заливалась в кольцевую канавку, остывала и на входе в башмак имела температуру, равную $T_{10} = 20^0 C$;

– карусельный кристаллизатор вращался с постоянной скоростью $n_K = 2$ об/мин.

Общая длина башмака определялась в каждом случае по формуле (2), что обеспечивало необходимое и достаточное усилие для реализации процесса СЛК. Следует отметить, что если конструктивно задается длина башмака L_{KOH} большей длины, чем рассчитанной по формуле (2), то во время реализации процесса СЛК возникает дополнительная сила трения на границе контакта заготовки и башмака, равная:

$$P_{PTB} = \frac{\mu_B \overline{\sigma_{SAT}} b_K^2 \varphi_{PTB}}{2} \left(\frac{2R_K}{b_K} + 1 \right), \quad (24)$$

где

$$\varphi_{PTB} = \frac{L_{KOH} - L_D - L_{AT} - L_{BX}}{R_K + b_K / 2}. \quad (25)$$

Кроме того, дополнительная протяженность башмака не только увеличивает энергозатраты, снижая коэффициент полезного действия процесса СЛК, но и приводит к увеличению силы прижима башмака.

Результаты и их обсуждение

Использование представленных математических зависимостей на практике не требует специальной подготовки инженерно-технического персонала, делает возможным проведения анализа влияния основных параметров процесса на изменение энергосиловых условий непрерывного прессования методом conform для разработки оптимальной технологии производства профилей или создания АСУ ТП с учетом результатов работы [8].

Результаты исследований представлены на рис. 3–7.

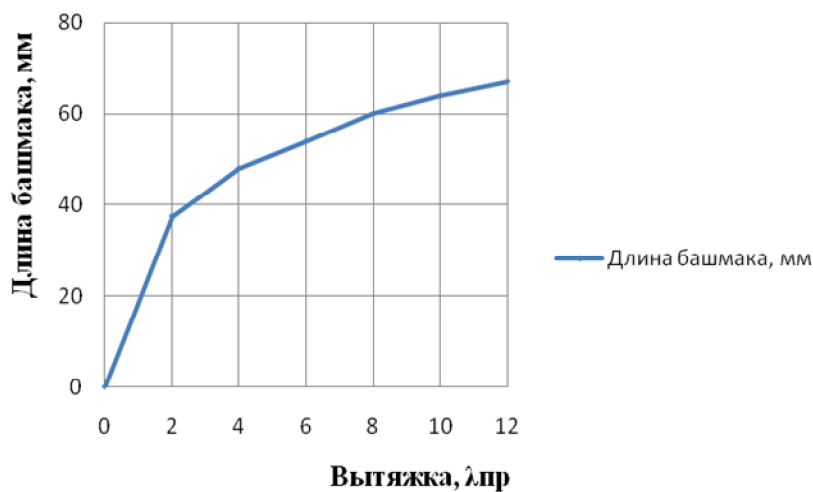


Рис. 3. Изменение длины башмака L_B от коэффициента вытяжки $\lambda_{пр}$

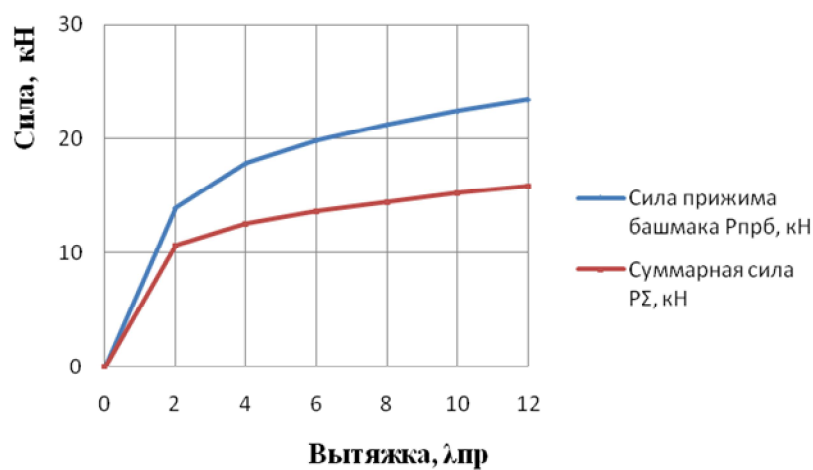


Рис. 4. Изменение сил прижима башмака $P_{прб}$ и суммарной силы P_{Σ} от коэффициента вытяжки $\lambda_{пр}$

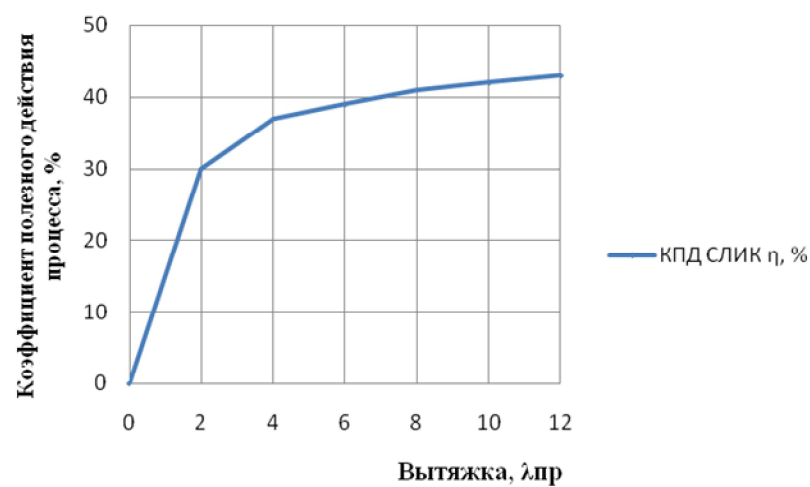


Рис. 5. Изменение коэффициента полезного действия процесса СЛИК η от коэффициента вытяжки $\lambda_{пр}$

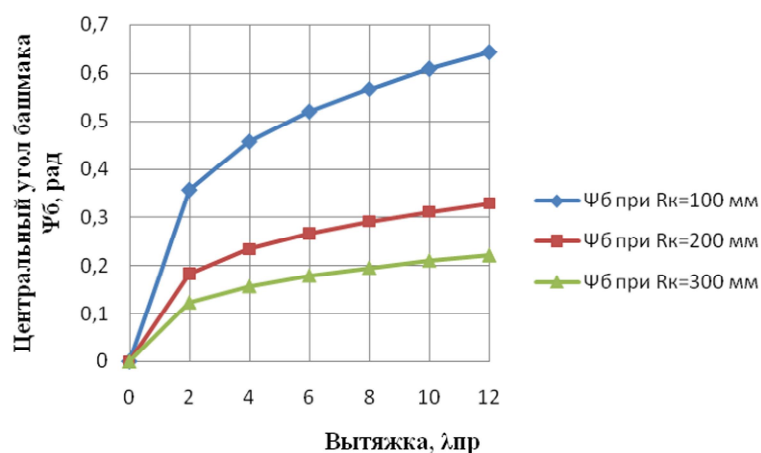


Рис. 6. Изменение центрального угла башмака Ψ_b от радиуса колеса R_k и коэффициента вытяжки $\lambda_{пр}$

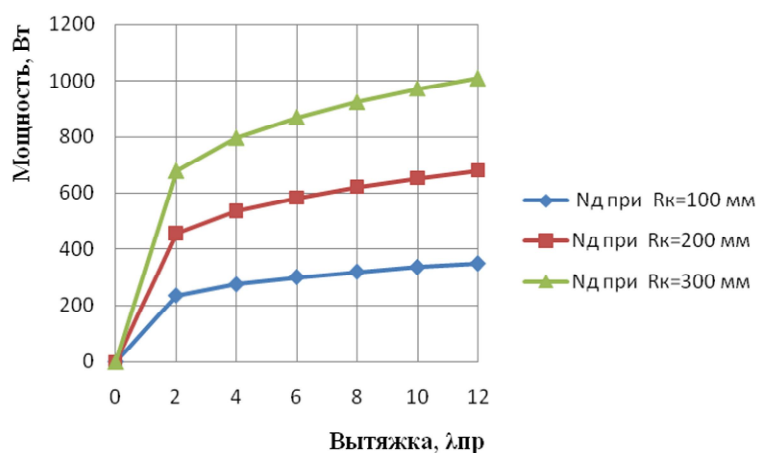


Рис. 7. Изменение мощности процесса деформирования N_d от радиуса колеса R_k и коэффициента вытяжки $\lambda_{пр}$

Выводы

Анализируя полученные результаты, можно отметить следующее:

1. Длина башмака в значительной мере зависит только от коэффициента вытяжки и возрастает с его увеличением, но при этом не изменяется от радиуса карусельного кристаллизатора.

2. Силы прижима башмака и суммарной силы при угловом выдавливании прутка методом conform определяются главным образом коэффициентом вытяжки и сопротивлением деформации обрабатываемого металла и увеличиваются с ростом их значений.

3. Центральный угол башмака возрастает с увеличением значений коэффициента вытяжки и уменьшением радиуса карусельного кристаллизатора.

4. Мощность процесса деформирования

возрастает с увеличением значений коэффициента вытяжки и радиуса карусельного кристаллизатора.

5. Коэффициент полезного действия процесса conform возрастает с увеличением значений коэффициента вытяжки при условии, что общая длина башмака определялась по формуле (2), что обеспечивало необходимое и достаточное усилие для реализации процесса СЛиК.

Список литературы

1. Основы проектирования процессов непрерывного прессования металлов: монография / Ю.В. Горохов, В.Г. Шеркунов, Н.Н. Довженко [и др.]. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. 268 с.
2. Корнилов В.Н. Непрерывное прессование со сваркой алюминиевых сплавов. Красноярск: Изд-во пед. ин-та, 1993. 216 с.
3. Перлин И.Л., Райтбарг Л.Х. Теория прессования металлов.

- М.: Металлургия, 1975. 448 с.
- Щерба В.Н., Райтбарг Л.Х. Технология прессования металлов. М.: Металлургия, 1995. 336 с.
 - Расчет оптимальной геометрии инструмента при непрерывном прессовании / В.М. Сергеев, В.Г. Шеркунов, Ю.В. Горохов [и др.] // Металлы. 1990. № 4. С. 183–188.
 - Довженко Н.Н., Сидельников С.Б., Васина Г.И. Система автоматизированного проектирования технологии прессования металлов. Научное методическое обеспечение: монография. Красноярск: ГАЦМиЗ, 2000. 196 с.
 - Ерманок М.З., Фейгин В.И., Сухоруков Н.А. Прессование профилей из алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1977. 264 с.
 - Автоматизация технологического процесса прессования профилей из сплавов алюминия и ее применение в производственных условиях / Н.Н. Довженко, С.Б. Сидельников, Пещанский А.С. [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. № 2. С. 39–42.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

ANALYSIS OF POWER CONDITIONS OF CONTINUOUS EXTRUSION BY THE CONFORM PROCESS

Belyaev Sergey Vladimirovich – D.Sc. (Eng.), Associate Professor, Head of the Foundry Engineering Department, the Institute of Non-Ferrous Metals and Materials Science, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. Phone: +7 (391) 213-36-21. E-mail: 244812@mail.ru.

Bogdanov Dmitry Vladimirovich – Postgraduate Student, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

Gubanov Ivan Yurievich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

Gorokhov Yuri Vasilievich – D.Sc. (Eng.), Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

Krokhin Alexander Yurievich – Project Manager of LLC RUSAL R&D Centre, Krasnoyarsk, Russia.

Frolov Viktor Fedorovich – Project Manager of LLC RUSAL R&D Centre, Krasnoyarsk, Russia.

Kostin Igor Vladimirovich – Postgraduate Student, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

Abstract. This article presents analytical dependences of calculations of power conditions of continuous extrusion by the conform process and analyzes the influence of the design parameters of the tool and deformation process conditions on power parameters of the conform process. For the first time the article considers parameters of a deformation zone and rheology of deformed steel to determine the pressing force. By applying the calculated dependences, the authors developed an algorithm to calculate changes in power conditions of continuous extrusion by the conform process, which was implemented in Microsoft Excel, determining power conditions during extrusion for discrete input of source data. A practical application of the solution in practice requires no special training of technical personnel, makes it possible to analyze the influence of main process parameters on changes in power conditions of continuous extrusion by the conform process to develop an optimal production technology for steel sections or create a PCS.

Keywords: Continuous extrusion by the conform process, analysis of power conditions of deformation.

References

- Gorokhov Yu.V., Sherkunov V.G., Dovzhenko N.N. et al. *Osnovy proektirovaniya protsessov nepreryvnogo pressovaniya metallov: monografiya* [Basics of designing processes of continuous extrusion of metals: a monograph]. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2013, 268 p.
- Kornilov V.N. *Nepreryvnoe pressovanie so svarkoj alyuminievykh splavov* [Continuous extrusion with welding of aluminum alloys]. Krasnoyarsk: Publishing House of the Pedagogical Institute, 1993, 216 p.
- Perlin I.L., Raitbarg L.Kh. *Teoriya pressovaniya metallov* [Theory of metal pressing]. Moscow: Metallurgy, 1975, 448 p.
- Shcherba V.N., Raitbarg L.Kh. *Teoriya pressovaniya metallov* [Technology of metal pressing]. Moscow: Metallurgy, 1995, 336 p.
- Sergeyev V.M., Sherkunov V.G., Gorokhov Yu.V. et al. The calculation of the optimum geometry of the tool during continuous extrusion. *Metally* [Metals]. 1990, no. 4, pp. 183–188.
- Dovzhenko N. N., Sidelnikov S.B., Vasina G.I. *Sistema avtomatizirovannogo proektirovaniya tekhnologii pressovaniya metallov. Nauchnoe metodicheskoe obespechenie: monografiya* [A computer-aided design of metal pressing technology. Scientific methodological support: a monograph]. Krasnoyarsk: GATsMiZ, 2000, 196 p.
- Ermanok M.Z., Feigin V.I., Sukhorukov N.A. *Pressovanie profiley iz alyuminievykh splavov* [Extrusion of aluminum alloy sections]. Moscow: Metallurgy, 1977, 264 p.
- Dovzhenko N.N., Sidelnikov S.B., Peshchansky A.S. et al. Automation of the aluminum alloy section extrusion process and its application in an industrial environment. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2011, no. 2, pp. 39–42.

Анализ энергосиловых условий непрерывного прессования методом conform / Беляев С.В., Богданов Д.В., Губанов И.Ю., Горохов Ю.В., Крохин А.Ю., Фролов В.Ф., Костин И.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №3. С. 44–51.

Belyaev S.V., Bogdanov D.V., Gubanov I.Yu., Gorokhov Yu.V., Krokhin A.Yu., Frolov V.F., Kostin I.V. Analysis of power conditions of continuous extrusion by the conform process. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 3, pp. 44–51.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ЗОНЫ РЕДУЦИРОВАНИЯ КАЛИБРА СТАНОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Курмачев Ю.Ф.

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

Аннотация. В работе рассматривается вопрос о проектировании и расчете зоны редуцирования трубной заготовки из алюминиевого сплава при холодной прокатке труб. Рассчитываются минимальная и максимальная длины зоны редуцирования, позволяющие выбрать ее оптимальную длину.

Ключевые слова: труба, холодная прокатка труб, зона редуцирования, вытяжка.

Введение

Холодная прокатка трубы производится на круглом конусном дорне (оправке), который служит внутренней жёсткой опорой. Рабочая длина ручья калибра состоит из следующих участков: участок редуцирования, обжимной, предотделочный (калибровка стенки трубы) и калибрующий диаметр трубы. Одним из основных параметров рабочей зоны калибра является зона редуцирования трубной заготовки. В зоне редуцирования происходит основное уменьшение диаметра заготовки на всей рабочей зоне, и упрочнение трубы при этом составляет до 70% от конечной твердости. Поэтому при заданной конусности редуцирования очень важно по возможности наиболее точно оценить размеры зоны редуцирования.

Методы исследования

Рассмотрим свободное редуцирование без натяжения при осаживании заготовки трубы на оправку. При этом сделано допущение, что неравномерность деформации существенно не влияет на изменение толщины стенки, также не учитываются сила внешнего трения. В отличие от холодной прокатки труб из сталей при холодной прокатке труб из алюминиевых сплавов на участке редуцирования всегда наблюдается увеличение толщины стенки. При увеличении стенки на участке редуцирования происходит значительное радиальное напряжение внутренней поверхности трубы, могущее привести к трещинам и иным дефектам перед непосредственной прокаткой на обжимной зоне. Твердость трубы в конце участка редуцирования составляет до 70% от увеличения твердости за весь цикл прокатки. Повышение твердости сопровождается значительным падением остаточного относительного

удлинения и пластичности металла. Вследствие этого на обжимном участке процесс прокатки происходит уже при малопластичном металле. Поэтому крайне важно правильно рассчитать зону редуцирования, включая ее длину, конусность редуцирования, утолщение стенки, упрочнение заготовки. Многочисленные исследования определения длины зоны редуцирования привели к различным эмпирическим формулам, зачастую противоречащим друг другу. В данной работе при упомянутых допущениях производится точный расчет минимального промежутка, определяющего длину зоны редуцирования.

При проектировании зоны редуцирования используются следующие обозначения:

l_p – длина зоны редуцирования,

D_o – диаметр заготовки,

t_o – толщина стенки заготовки,

k – конусность редуцирования по диаметру

положительная,

k_o – конусность оправки по диаметру положительная,

D_v – внутренний диаметр заготовки,

d_a – начальный диаметр оправки (в точке А),

d_b – диаметр оправки в точке Б,

D_b – диаметр трубы в точке Б,

t_b – толщина стенки трубы в точке Б,

F_o – площадь сечения заготовки,

F_b – площадь сечения трубы в точке Б,

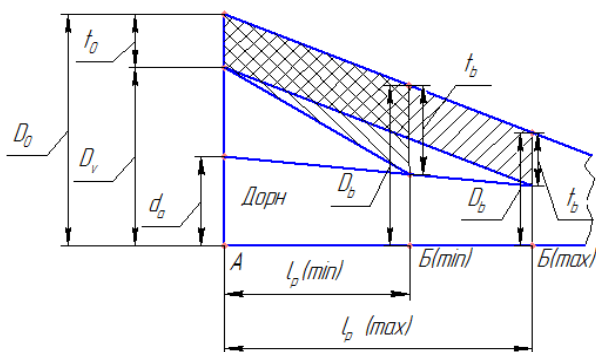
μ – вытяжка трубы на участке редуцирования.

Рассмотрим два предельных случая изменения стенки трубы на участке редуцирования. Первый – толщина стенки увеличивается, причем вытяжка в этом случае равна единице, то есть сохраняется величина площади сечения заготовки и площади сечения трубы в конце зоны редуцирования, и второй случай – толщина стенки на участке редуцирования остается неизменной. При этом считаем конусность редуцирования k заданной. При прокатке труб из алюминиевых сплавов конусность редуцирования выбирается от 0,10 до 0,12. При большей конусности редуцирования и короткой зоне редуцирования наблюдается появление дефектов на внутренней поверхности трубы.

Найдем минимальную и максимальную длины зоны редуцирования. Здесь максимальность понимается как минимальная из возможных максимальных длин. Минимальность понимается как максимальная из возможных минимальных длин. Ввиду этого предельные границы размеров длин зоны редуцирования оптимально сближены, после определения которых окончательно выбирается длина зоны редуцирования.

В первом случае (см. **рисунок**) вытяжка на участке редуцирования $\mu = 1$, тогда

$$(D_o - t_o)t_o = (D_b - t_b)t_b.$$



Зона редуцирования заготовки

Левая часть равенства известна, пусть $c = (D_o - t_o)t_o$, получаем квадратное уравнение относительно толщины стенки трубы в точке Б: $t_b^2 - D_b t_b + c = 0$, где $D_b = D_o - k l_p$, то есть

$$t_b^2 - (D_o - k l_p)t_b + c = 0 \quad (1)$$

Но $D_b - d_b = 2t_b$, с другой стороны:

$2t_b = (D_o - k l_p) - (d_a - k_o l_p)$, отсюда минимальная длина зоны редуцирования

$$l_{p(\min)} = \frac{D_o - d_a - 2t_b}{k - k_o}. \quad (2)$$

Подставим найденную l_p в полученное квадратное уравнение (1). После преобразований получим квадратное уравнение относительно t_b с известными коэффициентами

$$(k + k_o)t_b^2 + (k d_a - k_o D_o)t_b - (D_o - t_o)(k - k_o)t_o = 0. \quad (3)$$

Решив его, подставим найденную величину t_b в уравнение (2). Получаем минимальную длину зоны редуцирования.

Очевидно, что во втором случае (см. **рисунок**), когда толщина стенки трубы на участке редуцирования остается неизменной и вытяжка $\mu > 1$, длина зоны редуцирования максимальная. Тогда $d_b = d_a - l_p k_o$ или

$d_b = D_v - l_p k$, отсюда максимальная длина зоны редуцирования

$$l_{p(\max)} = \frac{D_v - d_a}{k - k_o}. \quad (4)$$

Заметим, что в числителе стоит зазор между заготовкой и оправкой $D_v - d_a$ по диаметру в точке А, который определяется технологически из внешней предельной кривизны заготовки на единицу длины.

Найдем вытяжку на участке редуцирования. Так как $t_b = (D_b - d_b)/2$, то площадь сечения

трубы в точке Б $F_b = \pi(D_b - \frac{D_b - t_b}{2})(\frac{D_b - t_b}{2})$

или $F_b = \pi(\frac{D_b^2 - d_b^2}{4})$. Площадь сечения заготовки равна $F_o = \pi(D_o - t_o)t_o$. Вытяжка на

участке редуцирования $\mu = F_o / F_b$ или

$\mu = \frac{4(D_o - t_o)t_o}{D_b^2 - d_b^2}$. Заметим, что так как стенка

трубы на участке редуцирования в рассматриваемом случае не меняется, то $t_b = t_o$ и вытяжку

на АБ можно выразить иначе: $\mu = \frac{(D_o - t_o)t_o}{(D_b - t_b)t_b}$

или $\mu = \frac{D_o - t_o}{D_b - t_o}$. Полученная вытяжка $\mu > 1$,

так как $D_o > D_b$. Полученная длина зоны редуцирования максимальна. Здесь максимальность понимается как минимальная из возможных максимальных длин. Минимальность понимается как максимальная из возможных минимальных длин.

Таким образом, получены формулы, позволяющие определить точные границы величины зоны редуцирования:

$$\frac{D_o - d_a - 2t_b}{k - k_o} < l_p < \frac{D_v - d_a}{k - k_o} \text{ или } \frac{D_o - d_a - 2t_b}{k - k_o} < l_p < \frac{D_o - d_a - 2t_o}{k - k_o}. \quad (5)$$

Технолог выбирает длину зоны редуцирования, учитывая предложенное утолщение стенки трубы в точке Б, равное разнице $t_b - t_o$.

Рассмотрим пример прокатки трубы на стане ХПТ-90 из сплава Д16 по маршруту $38 \times 3 \rightarrow 24 \times 1$ (здесь и далее размеры в миллиметрах). При этом $D_o = 38$, $t_o = 3$,

$k_o = 0,005$, $k = 0,12$, $D_v - d_a = 7,14$, $d_a = 24,86$. Получаем в первом случае $l_{p(\min)} = 51,13$, во втором случае $l_{p(\max)} = 62,09$, разница составляет менее 9 мм, выбираем длину зоны редуцирования $l_p = 56$. Утолщение стенки трубы в точке Б при этом составит 0,71. Вытяжка на участке редуцирования $\mu = 1,059$, что соответствует некоторым эмпирическим формулам [1, 2].

Выводы

Предложенная методика проектирования и расчета зоны редуцирования проста, точна, легко программируется, реализована в пакете программ расчета калибра в среде Quick Basic и внедрена в производство холоднокатаных труб из алюминиевых сплавов на Красноярском металлургическом заводе.

Список литературы

1. Шевякин Ю.Ф. Калибровка и усилия при холодной прокатке труб. М.: Металлургиздат, 1968. 268 с.
2. Шевякин Ю.Ф., Глейберг А.З. Производство труб. М.: Металлургия, 1968. 440 с.
3. Орлов Г.А. Пути совершенствования калибровок инструмента станов холодной прокатки труб // Сталь. 2004. № 12. С. 83–85.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DESIGN AND CALCULATION OF A REDUCING ZONE OF GROOVES FOR COLD ROLLING MILLS FOR TUBES FROM ALUMINUM ALLOYS

Kurmachev Yuri Fedorovich – Ph.D. (Eng), Associate Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: kurmach@mail.ru.

Abstract. The paper discusses the design and calculation of a reducing zone of tube stock from an aluminum alloy during cold tube rolling. Minimum and maximum lengths of the reducing zone were calculated to select its optimal length.

Keywords: Tube, cold tube rolling, reducing zone, reduction ratio.

References

1. Shevakin Yu.F. *Kalibrovka i usiliya pri kholodnoj prokatke trub* [Calibration and forces during cold rolling of tubes]. Moscow: Metallurgizdat, 1968, 268 p.
2. Shevakin Yu.F., Gleyberg A.Z. *Proizvodstvo trub* [Production of tubes]. Moscow: Metallurgy, 1968, 440 p.
3. Orlov G.A. Ways of improving the tool calibration for cold rolling mills of tubes. *Stal'* [Steel]. 2004, pp. 83–85.

Курмачев Ю.Ф. Проектирование и расчет зоны редуцирования калибра станов холодной прокатки труб из алюминиевых сплавов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №3. С. 52–54.

Kurmachev Yu.F. Design and calculation of a reducing zone of grooves for cold rolling mills for tubes from aluminum alloys. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 3, pp. 52–54.

УДК 621.774.37

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОПТИМИЗАЦИИ ГЕОМЕТРИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ВОЛОЧЕНИЯ

Колмогоров Г.Л., Чернова Т.В., Бурдина Ю.А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

Аннотация. В работе предложена методика оптимизации технологического волочильного инструмента из условия обеспечения минимального напряжения при волочении. Рассмотрен производственный эксперимент волочения алюминиевой проволоки с использованием оптимальной геометрии волочильного инструмента, эффективность оптимизации. Сопоставлены напряжения волочения с использованием инструмента оптимальной геометрии и инструмента неоптимальной геометрии. Показано влияние противонапряжения на величину оптимальных углов волочильного инструмента.

Ключевые слова: волочение, волочильный инструмент, оптимизация, оптимальный угол волоки, противонапряжение.

Введение

При обработке металлов давлением находит применение процесс волочения, заключающийся в протягивании заготовки через волочильный инструмент. При волочении сечение заготовки принимает сечение конического волочильного инструмента. Данный процесс наиболее широко применяется при производстве проволоки и прутков, имеющих поперечное сечение в форме круга [1, 2].

Как и любой процесс обработки металлов давлением, волочение характеризуется определенной энергоемкостью, снижение которой является актуальной проблемой.

Энергосиловые параметры при волочении определяются главным образом геометрией волочильного инструмента, одной из основных характеристик при этом является $\alpha_{\text{в}}$ – угол наклона образующей рабочего конуса волочильного инструмента к оси волочения [3]. Оптимизация угла $\alpha_{\text{в}}$ позволяет обеспечить минимальные значения напряжения волочения, что дает возможность снизить энергопотребление, уменьшить вероятность обрыва переднего конца заготовки, повысить единичные обжатия и стойкость волочильного инструмента.

Теория, материалы и методы исследования

При выполнении технологических расчетов для определения напряжения волочения наибольшей вероятностью пользуется упрощенная формула И.Л. Перлина [1]

$$\sigma_{\text{вол}} = \ln \frac{F_0}{F_1} [\sigma_{\text{sc}} + f \operatorname{tg} \alpha_{\text{п}} (\sigma_{\text{sc}} - \sigma_0)] + \sigma_0, \quad (1)$$

где F_0 и F_1 – площади сечения до и после прохода соответственно; σ_{sc} – усредненное по зоне деформации сопротивление деформации протягиваемого металла; f – коэффициент внешнего трения между обрабатываемым металлом и волочильным инструментом; $\alpha_{\text{п}}$ – приведенный угол волоки, учитывающий наличие калибрующего пояска; $\operatorname{tg} \alpha_{\text{п}} = 0,65 \operatorname{tg} \alpha_{\text{с}}$; $\alpha_{\text{с}}$ – угол наклона образующей волоки к оси волочения; σ_0 – напряжение противонапряжения.

В формуле (1) отношение площадей F_0 и F_1 является коэффициентом вытяжки, который для прутков и проволоки круглого сечения имеет вид

$$\lambda = \frac{F_0}{F_1} = \frac{d_0^2}{d_1^2}. \quad (2)$$

Недостатком формулы (1) является то, что она не позволяет определить оптимальный угол волочильного инструмента. Это связано с тем, что множитель $F_0 / F_1 = \ln \lambda$ трактуется в формуле (1) как степень деформации при волочении, которая не учитывает дополнительные сдвиговые деформации на входе в волоку и выходе из нее.

В работе [4] предложена уточненная формула для определения средней степени деформации за проход при волочении, учитывающая сдвиговые деформации на входе в волочильный инструмент и выходе из него:

$$\varepsilon_{\text{ср}} = \ln \lambda + \frac{4 \operatorname{tg} \alpha_{\text{с}}}{3\sqrt{3}}. \quad (3)$$

Степень деформации в формуле (3) определяется, как $\ln \lambda$, и дополнена вторым слагаемым, которое учитывает дополнительные сдвиговые деформации в технологическом инструменте.

С учетом формулы (3) предложена уточненная формула для напряжения волочения [4].

$$\sigma_{вол} = \left(\ln \lambda + \frac{4tg\alpha_{\epsilon}}{3\sqrt{3}} \right) \times [\sigma_{sc} + fctg\alpha_{\Pi}(\sigma_{sc} - \sigma_0)] + \sigma_0. \quad (4)$$

В отличие от формулы (1) формула (4) позволяет определить оптимальное значение угла конусности волочильного инструмента из условия минимума напряжения волочения

$$\partial \sigma_{вол} / \partial tg\alpha_{\epsilon} = 0. \quad (5)$$

Продифференцировав выражение (4) согласно условию (5), после преобразований и упрощений получим соотношение для определения оптимального значения $tg\alpha_{\epsilon}$ [5,6]:

$$tg\alpha_{\epsilon}^{opt} = 1,414 \sqrt{f(1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{sc}}) \ln \lambda}. \quad (6)$$

И соответственно

$$\alpha_{\epsilon}^{opt} = \arctg \left[1,414 \sqrt{f(1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{sc}}) \ln \lambda} \right]. \quad (7)$$

Аналогичный подход к определению оптимальных углов технологического инструмента использован в работе [7].

Из формулы (7) следует, что оптимальные углы конусности возрастают с увеличением коэффициента трения и коэффициента волочения.

Результаты исследования и их обсуждение

С целью проверки полученных результатов в ОАО «Камкабель» проведены испытания по усовершенствованию технологии волочения алюминиевой проволоки по маршруту 14,0-12,7-10,7-9,00-7,60-6,56 мм со скоростью волочения 3,57 м/с.

По существующей на заводе технологии угол рабочей зоны составляет 28°. Маршрут волок прослеживали (проводили чистку, осмотр и оценку состояния поверхности наклона волок, измерение диаметра выходной проволоки). До полного износа маршрута было протянуто 166,6 км алюминиевой проволоки диаметром 6,56 мм. По

предложенной технологии твердосплавные волокнистые материалы имели расчетный оптимальный угол рабочей зоны 28°. Контроль за состоянием волок включал те же элементы контроля. До полного износа волок по заведенному маршруту общее количество произведенной алюминиевой проволоки составило 475,7 км.

Таким образом, при использовании волок с оптимальным углом рабочей зоны 28° увеличивает выпуск алюминиевой проволоки на одном маршруте в 2,9 раза по сравнению с существующим маршрутом. Качество поверхности проволоки было удовлетворительным.

Можно полагать, что увеличение стойкости волок связано с изменением силовых условий волочения за счет оптимизации геометрии волочильного инструмента, что привело к снижению действующих на инструмент усилий.

С целью оценки эффективности оптимизации геометрии волочильного инструмента выполнили сопоставление напряжения волочения при использовании инструмента оптимальной и произвольной геометрии.

На рис. 1 приведены расчетные значения отношения напряжения волочения, рассчитанное по формуле (4), к напряжению волочения, рассчитанного по такой же формуле, но для оптимальных значений угла α_{ϵ} .

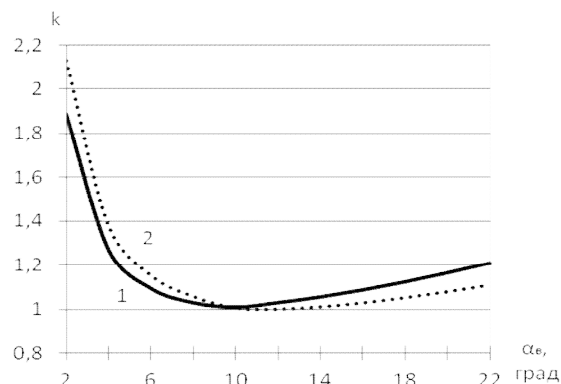


Рис. 1. Эффективность оптимизации геометрии волочильного инструмента

Расчет выполнен для коэффициента граничного трения $f = 0.10$ и коэффициентов вытяжки $\lambda = 1.2$ (кривая 1) и $\lambda = 1.3$ (кривая 2).

Как следует из рис. 1, минимальное значение отношения, равное единице, соответствует оптимальному углу α_{ϵ} . По мере удаления от оптимального значения отношение напряжений становится больше единицы, интенсивность увеличения напряжения волочения особенно характерна для $\alpha_{\epsilon} < \alpha_{\epsilon}^{opt}$.

Данные, приведенные на **рис. 1**, согласуются с результатами конечно-элементного моделирования процесса волочения изделий круглого сечения, которые определяют зону оптимальных углов рабочего конуса волоки в интервале $9-12^\circ$ [8].

В формулу напряжения волочения (4) входит противонапряжение, роль которого в технологии волочения является малоизученной. Известно лишь, что противонапряжение существенно изменяет условия деформации металла, способствует уменьшению внешнего трения и повышению стойкости волок [8–10]. По приведенной методике выполнена оптимизация углов волочильного инструмента в зависимости от величины противонапряжения, отнесенного к сопротивлению деформации. Результаты расчета приведены на **рис. 2**.

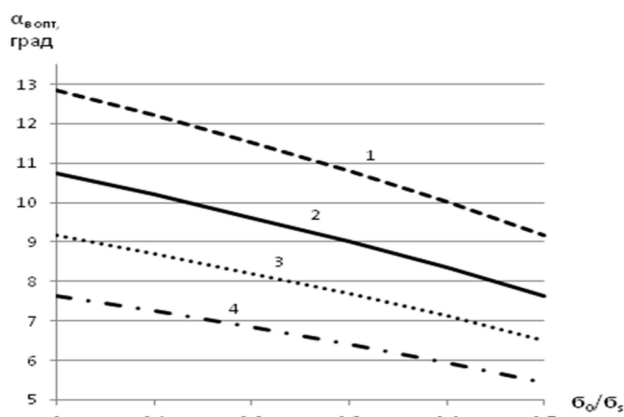


Рис. 2. Зависимость оптимальных углов от противонапряжения:

- 1- $\lambda = 1.2$, $f = 0.05$; 2- $\lambda = 1.2$, $f = 0.05$;
3- $\lambda = 1.3$, $f = 0.05$; 4- $\lambda = 1.3$, $f = 0.10$

Из **рис. 2** следует, что с увеличением противонапряжения значения оптимальных углов уменьшаются.

Выводы

1. Приведена методика оптимизации углов технологического инструмента при волочении.
2. На примере волочения алюминиевой проволоки в заводских условиях показана эффективность оптимизации углов волочильного инструмента.
3. Расчетным путем показано влияние оптимальных углов волочильного инструмента на величину напряжения волочения.
4. Показано влияние противонапряжения на величину оптимальных углов инструмента.

Список литературы

1. Перлин И.Л., Еманюк М.З. Теория волочения. М.: Металлургия, 1972. 448 с.
2. Ерманок М.З. Развитие теории волочения // Цветная металлургия, 1986. №9. С. 81–83.
3. Колмогоров Г.Л., Ковалев А.Е., Бажин А.А. // Изв. вузов. Черная металлургия. 2002. №9. С. 64–65.
4. Колмогоров Г.Л. Гидродинамическая смазка при обработке металлов давлением. М.: Металлургия, 1986. 168 с.
5. Пат. 2310533 Российская Федерация, МПК В 21с 1/00. Способ волочения изделий / Колмогоров Г.Л., Латышева Т.В., Мельникова Т.Е.; патентообладатель ПНИПУ. №2006112366/02; опубл. 20.11.2007.
6. Пат. 2404873 Российская Федерация, МПК 21с 1/00. Способ волочения прутковых и проволоочных изделий / Колмогоров Г.Л., Чернова Т.В.; патентообладатель ПНИПУ. №2009137345/02; опубл. 27.11.2010.
7. Колмогоров Г.Л., Снигирева М.В., Аверьянова Е.М. Оптимизация технологии производства полиметаллических сверхпроводниковых композитов // Металлург. 2014. №12. С. 72–76.
8. Моделирование процесса волочения круглых изделий с противонапряжением / Каргин В.Р., Колесникова С.Ю., Сергеев Ю.А., Каргин Б.В. // Металлург. 2014. №10. С. 66–70.
9. Торнавский А.Л. Эффективность волочения с противонапряжением. М.: Металлургия, 1959. 152с.
10. Леванов А.Н. Колмогоров В.Л., Буркин С.П. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1976. 416 с.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

EFFICIENCY OF OPTIMIZATION OF A DRAWING TOOL GEOMETRY

Kolmogorov German Leonidovich – D.Sc. (Eng.), Professor, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia. E-mail: dpm@pstu.ru.

Chernova Tatyana Vyacheslavovna – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia. E-mail: dpm@pstu.ru.

Burdina Yuliya Alexandrovna – Postgraduate Student, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia. E-mail: dpm@pstu.ru.

Abstract. This paper describes methods to optimize a drawing tool ensuring minimum stress during drawing. Industrial experiments of drawing aluminum wire with the optimal drawing tool geometry showed efficiency of such optimization. Drawing stresses of tools with an optimal

geometry and non-optimal one were compared. The authors showed how back force influenced values of optimal angles of drawing tools.

Keywords: Drawing, drawing tool, optimization, optimal die angle, back force

References

1. Perlín I.L., Ermanok M.Z. *Teoriya volocheniya* [The theory of drawing]. Moscow: Metallurgy, 1972, 448 p.
2. Ermanok M.Z. Development of the theory of drawing. *Tsvetnaya metallurgiya* [Non-ferrous metallurgy]. 1986, no. 9, pp. 81-83.
3. Kolmogorov G.L., Kovalev A.E., Bazhin A.A. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy]. 2002, no. 9, pp. 64-65.
4. Kolmogorov G.L. *Gidrodinamicheskaya smazka pri obrabotke metallov davleniem* [Hydrodynamic lubrication for metal forming]. Moscow: Metallurgy, 1986, 168 p.
5. Kolmogorov G.L., Latysheva T.V., Melnikova T.E. *Sposob volocheniya izdelij* [A method of drawing products]. Patent RF, no. 2310533, 2007.
6. Kolmogorov G.L., Chernova T.V. *Sposob volocheniya prutkovykh i provolochnykh izdelij* [A method of drawing rod and wire products]. Patent RF, no. 2404873 2010.
7. Kolmogorov G.L., Snigireva M.V., Averianova E.M. Optimization of production technology for polycrystalline superconducting composites. *Metallurg* [Metallurgist]. 2014, no. 12, pp. 72-76.
8. Kargin V.R., Kolesnikova S.Yu., Sergeev Yu.A., Kargin B.V. Simulation of the process of drawing round products with back force. *Metallurg* [Metallurgist]. 2014, no. 10, pp. 66-70.
9. Tornavsky A.L. *Ehffektivnost' volocheniya s protivonatyazheniem* [Efficiency of drawing with back force]. Moscow: Metallurgy, 1959, 152 p.
10. Levanov A.N., Kolmogorov V.L., Burkin S.P. *Kontaknoe trenie v protsessakh obrabotki metallov davleniem* [Contact friction in metal forming processes]. Moscow: Metallurgy, 1976, 416 p.

Колмогоров Г.Л., Чернова Т.В., Бурдина Ю.А. Эффективность оптимизации геометрии технологического инструмента для волочения // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №3. С. 55–58.

Kolmogorov G.L., Chernova T.Vy., Burdina Yu.A. Efficiency of optimization of a drawing tool geometry. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 3, pp. 55–58.

УДК 621.771.63

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КАЛИБРОВОК ВАЛКОВ ПРОФИЛЕГИБОЧНЫХ СТАНОВ

Шемшурова Н.Г.¹, Корнилов В.Л.², Антипанов В.Г.

¹Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

²АНО ДПО «КЦПК «Персонал», Магнитогорск, Россия

Аннотация. Определены рациональные принципы разработки калибровок валков для производства гнутых профилей различного типа. Они позволят корректировать исходную калибровку, повышая эффективность ее использования, и формализовать поиск улучшенного технического решения. Методика может быть заложена в программу научно обоснованного автоматизированного расчета калибровки валков.

Ключевые слова: принципы разработки калибровки валков, сортовые гнутые профили, гофрированные профили, профили высокой жесткости.

Введение

Гнутые профили позволяют экономить металл при производстве конструкций, снижают вес оборудования, сокращают трудозатраты на сборку и являются более дешевыми по сравнению с другими видами проката.

Калибровка валков является основой технологического процесса профилирования. Задача калибровки – получение из плоской заготовки гнутого профиля заданной конфигурации за минимальное число проходов [1–12].

Однако:

– с уменьшением числа проходов необходимо увеличивать углы подгибки, которые не должны превышать предельно допускаемые значения, определяемые:

- способностью металла к деформации;
- конструкцией и формой калибров валков;
- условиями задачи полосы в калибр;

– допустимостью искажения геометрии профиля и др.;

– уменьшение числа проходов при формовке связано с повышением энергозатрат и увеличением износа валков.

Разработка принципов калибровки валков предусматривает:

- 1) возможность формовки профиля требуемой конфигурации с гарантией качественного получения конструктивно важных размеров;
- 2) минимальный износ валков;
- 3) минимальные энергозатраты;
- 4) минимальную трудоемкость изготовления и настройки валков;
- 5) минимальные остаточные напряжения в профиле;
- 6) необходимое и достаточное количество металла в месте изгиба;
- 7) выбор основной оси профилирования, промежуточных форм профиля, внутренних ра-

диусов закругления в местах изгиба, режима профилирования.

Подход к выбору системы калибровки для каждого профиля должен быть индивидуальным, а многообразие факторов, влияющих на качество калибровки, требует их рационализации.

Методика эксперимента

При определении основных принципов разработки калибровок валков использовали метод экспертного опроса специалистов и априорного ранжирования основных принципов расчета [13].

Экспертам были предложены принципы калибровки валков для производства гнутых профилей трех типов: сортовых, гофрированных и профилей высокой жесткости, которые они должны были проранжировать.

В качестве характеристики степени согласованности суждений экспертов использовали коэффициент конкордации Кендэла.

$$W = \frac{S}{(1/12)m^2(K^3 - K) - m \sum_{j=1}^m T_j}; \quad (1)$$

$$T_j = (1/12) \sum_{ij} t_j^3 - t_j, \quad (2)$$

где S – сумма квадратов разностей между средней оценкой факторов и суммой оценок, полученных от экспертов по одному принципу; t_j – число одинаковых рангов в j -м ряду у одного эксперта; m – число экспертов; K – число принципов.

Значимость коэффициента конкордации W оценивали по распределению критерия Пирсона

$$\chi^2 = mW(K - 1). \quad (3)$$

Для вычисления надежности оценки каждого фактора использовали коэффициент надежности Спирмэна-Брауна:

$$r_i = \frac{n_i r_1}{1 + (n_i - 1)r_1}. \quad (4)$$

Несмещенную оценку «истинного» ранга определяли как

$$x_{i_{\text{ис}}} = M(1 - r_i) + r_i M_i, \quad (5)$$

где r_i – коэффициент надежности для полного объема выборки; r_1 – его значение после изменения объема выборки; n – отношение нового объема выборки к первоначальному; M – математическое ожидание.

Анализ полученных результатов

Результаты ранжирования принципов представлены в табл. 1. Чем меньше число ранга, тем важнее принцип.

Следует отметить, что в литературных источниках принципы расчета калибровок валков для профилирования ограничиваются только одним принципом: рациональность расчета калибровки валков (у нас это 7-й принцип).

Таблица 1

Упорядоченные принципы построения калибровки валков ПГС

Номер ранга	Номер принципа	Содержание принципа калибровки
1	7б	Рациональность калибровки валков: возможность формовки профиля требуемой конфигурации с гарантией получения конструктивно важных размеров
2	3	Максимальное соответствие получаемого профиля требованиям потребителя, в том числе возможность получения качественной поверхности
3	6	Высокая жесткость готового изделия
4	7в	Рациональность калибровки валков: минимальный износ валков
5	7а	Рациональность калибровки валков: минимальный расход металла на изготовление валков
5	7д	Рациональность калибровки валков: минимальная трудоемкость изготовления и настройки валков
5	7ж	Рациональность калибровки валков: необходимое и достаточное количество металла в месте изгиба
8	7з	Рациональность калибровки валков: выбор основной оси профилирования, промежуточных форм профиля, внутренних радиусов закругления в местах изгиба, режима профилирования
9	4	Обеспечение надлежащего качества заготовки с помощью валкового инструмента
10	7е	Рациональность калибровки валков: минимальные остаточные напряжения в профиле
11	7и	Рациональность калибровки валков: выбор системы калибровок валков
12	1	Унификация калибровок и минимальное количество клеток ПГС и элементов валков
13	7к	Рациональность калибровки валков: выбор типа закрытия калибра
14	7г	Рациональность калибровки валков: минимальные энергозатраты
15	2	Возможность выполнения отдельных элементов валков ПГС из более дешевых материалов или устранение этих элементов
16	5	Максимальное количество неприводных верхних валков

В большей степени указанные принципы калибровки влияют на такие показатели процесса профилирования, как:

➤ минимизация трудозатрат на изготовление валков;

- отсутствие концевых дефектов (устранение эффекта пружинения);
- минимальные остаточные напряжения в профиле;
- высокая точность геометрии получаемого сечения;
- исправление дефектов заготовки: скручивания по длине; разноширинности профиля; серповидности; неплоскостности;
- минимум энергозатрат на формовку профиля;
- повышение износостойкости валков;
- повышение качества поверхности профиля.

В процессе исследования были определены принципы, которые необходимо учитывать при расчете калибровок валков в первую очередь (табл. 2).

Таблица 2

Основопологающие ранжированные принципы расчета калибровок валков профилегибочных станов

Тип профиля	Номер принципа (согласно табл. 1)			
Сортовые гнутые профили	7б	1	3	
Гофрированные профили	3	7б	7з	
Профили высокой жесткости	7б	3	6	7в*

* Валки ПГС 1-5×300-1650 металлоемкие, поэтому важно при расчете калибровки учесть равномерность их износа.

Рекомендации по использованию принципов построения калибровки валков с целью повышения качества формуемых профилей [4]:

1. Отбирают n принципов калибровки, начиная с принципов высшего ранга, число которых ограничивают в случае достижения влияния принципов калибровки на все показатели процесса профилирования (например, при формовке ПВЖ это принципы 7 б, 3, 6, 7 в, см. табл. 2).

2. Выбирают рациональные принципы для расчета конкретной калибровки с учетом показателей качества, необходимых потребителю.

3. Выполняют оценку использования основополагающих принципов калибровки в различных решениях калибровки профиля: для каждой из предложенных калибровок определяют основополагающие принципы, заложенные в данную калибровку. Принципы, дающие положительный результат, оценивают знаком «+», принципы, дающие отрицательный результат, – знаком «-». Коэффициент эффективности калибровок определяют по формуле

$$k_s = \sum \frac{1}{\text{ранг принципа}}, \quad (6)$$

где n – количество использованных принципов для расчета данной калибровки; R_{np} – ранги использованных принципов.

Суть данной оценки заключается в том, что чем больше принципов калибровки с более высоким рангом и с положительным результатом используется в калибровке профиля, тем более высокий положительный эффект она дает.

Данная оценка позволяет в ряде случаев корректировать исходную калибровку, повышая эффективность ее использования, а также формализовать поиск нового технического решения. Предложенная методика может быть заложена в программу научно обоснованного автоматизированного расчета калибровки валков для производства гнутых профилей различного типа.

Как видно из табл. 2, при проектировании калибровок сортовых гнутых профилей предлагается всегда использовать принципы 7б (1-й ранг) – его учет при расчете калибровок гарантирует достижение высокой точности геометрии получаемого сечения и отсутствие концевых дефектов за счет эффекта пружинения; 1 (2-й ранг) – позволяет: формовать профили смежных толщин, аналогичной конфигурации поперечного сечения, адекватной высоты формовки, использовать отдельные элементы валков для производства других профилей, минимизировать трудозатраты на изготовление валков и повысить их износостойкость; 3 (3-й ранг) – позволяет: использовать отдельные элементы валков для производства родственных профилей, минимизировать трудозатраты на изготовление валков и энергозатраты на формовку профиля, иметь минимальные остаточные напряжения в профиле, получить высокую жесткость профиля и точность геометрических размеров сечения, исправить практически все геометрические дефекты заготовки, повысить износостойкость валков и качество поверхности профиля.

Другие принципы могут быть использованы по усмотрению калибровщика, если в них возникнет такая необходимость (например, по требованию потребителя).

Например, необходимо сравнить два варианта калибровок для производства гнутого швеллера. Различие состоит в том, что в первом варианте подгибка полок швеллера осуществляется последовательно в 9 клетях до требуемого угла подгибки (90°), а во втором, предлагаемом, варианте в предпоследней клетке полки швеллера перегибаются на 100°, после чего полки в последней клетке разгибаются до 90° [14, 15].

При этом общими для обоих вариантов являются принципы:

– унификация калибровок и минимальное ко-

личество клетей ПГС (принцип 1, имеет 2-й ранг);

- максимальное соответствие получаемого профиля требованиям потребителя (соответственно принцип 3, 3-й ранг);
- обеспечение надлежащего качества заготовки с помощью валкового инструмента (принцип 4, 12-й ранг);
- высокая жесткость готового профиля (принцип 6, 5-й ранг);
- возможность формовки профиля требуемой конфигурации с гарантией получения конструктивно важных размеров (принцип 7б, 1-й ранг);
- необходимое и достаточное количество металла в месте изгиба (принцип 7ж, 6-й ранг);
- выбор типа закрытия калибра (принцип 7к, 7-й ранг).

С целью устранения концевых дефектов профиля – пружинения, образующегося за счет накопления остаточных напряжений, добавляем десятую клеть и получаем калибровку с дополнительным показателем процесса профилирования помимо имеющихся – отсутствие концевых дефектов, на которые влияют в данном случае принципы 7е (15-й ранг) и 7з (4-й ранг). При этом коэффициент эффективности в первом случае составляет $k_1=2,42$; во втором $k_2=2,99$. То есть во втором случае получим профиль более высокого качества.

Оценим использование основополагающих принципов калибровки в двух различных решениях формовки профиля высокой жесткости с

трапецевидными гофрами. За основу выбраны два технических решения [16, 17].

Суть технического решения [16] заключается в том, что с целью уменьшения серповидности профиля формируют разновысокие по ширине полосы гофры путем перекоса валков в вертикальной плоскости (рис. 1).

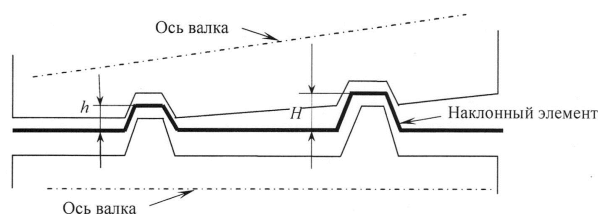


Рис. 1. Перекос валков в вертикальной плоскости [9]

Суть технического решения [17] – с целью устранения утяжки профиля по ширине одновременно с обжатием плоских участков производят обжатие и наклонных элементов формируемых гофров (рис. 2).

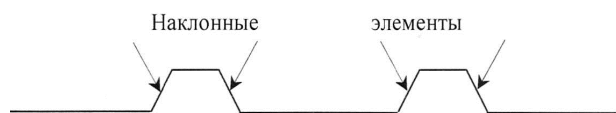


Рис. 2. Обжатие наклонных элементов гофров [17]

Результаты оценки этих калибровок представлены в табл. 3.

Таблица 3

Оценка коэффициента эффективности рассмотренных калибровок

Использованные принципы	Патент РФ № 2113927 [16]	Патент SU № 965546 [17]
3 – Соответствие профиля требованиям потребителя (ранг 2)	+	+
4 – Качество с помощью валкового инструмента (ранг 9)	+	
6 – Высокая жесткость (ранг 3)	– (снижается за счет увеличения высоты гофра)	+
7б – Получение конструктивно важных размеров (ранг 1)		+
7в – Минимальный износ валков (ранг 4)		– (за счет обжатия увеличивается износ)
7г – Минимальные энергозатраты (ранг 14)		– (за счет обжатия растут затраты)
7д – настройка валков (ранг 5)	– (перекос валков затрудняет настройку)	
7ж – Достаточное количество металла в месте изгиба (ранг 5)	+	+
Коэффициент эффективности	$k_1 = \frac{1}{2} + \frac{1}{9} - \frac{1}{3} - \frac{1}{5} + \frac{1}{5} = 0,2778$	$k_2 = \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{1} + \frac{1}{5} - \frac{1}{4} - \frac{1}{14} = 1,712$

Таким образом, техническое решение [16] наиболее эффективно использует основополагающие принципы калибровки при достижении заданной цели. Данное решение в большей степени можно рекомендовать для использования при проектировании калибровки другого похожего профиля. Техническое решение [8] использует принцип калибровки высокого ранга с отрицательным результатом (принцип 6, высокая жесткость профиля – ранг 3).

С целью повышения качества производимых ПВЖ в данную калибровку следует заложить 6-й принцип с положительным результатом.

Проведя анализ, по какой причине данный принцип ухудшает калибровку, пришли к выводу, что увеличение высоты гофра со стороны боковой кромки листовой заготовки, имеющей серповидность, понижает жесткость профиля. Поэтому для повышения жесткости профиля предлагается гофр со стороны, имеющей серповидность, не увеличивать, а гофр с противоположной стороны уменьшить на величину, на которую ранее увеличивали другой гофр. Тогда коэффициент эффективности рассматриваемой калибровки составит

$$k_3 = \frac{1}{2} + \frac{1}{9} + \frac{1}{3} - \frac{1}{5} + \frac{1}{5} = 0,944.$$

Согласно разработанным принципам с целью улучшения качества профилей высокой жесткости путем повышения равномерности износа валков предложено техническое решение [18].

Заключение

Таким образом, ранжирование принципов калибровки позволило:

- выявить принципы калибровки, которые необходимо закладывать в расчет калибровки валков для формовки гнутого профиля любого типа;
- применить результаты ранжирования принципов к научно обоснованному автоматизированному расчету калибровок;
- оценить существующие калибровки профилей с точки зрения использования ими основополагающих принципов расчета калибровки;
- формализовать поиск улучшенного технического решения.

Список литературы

1. Исследование износа валков профилирующего стана / С.А. Тулупов, Н.Г. Шемшурова, В.Г. Антипанов и др. // Сталь. 1985. №6. С. 56–58.
2. Шемшурова Н.Г., Антипанов В.Г., Хачин Д.В. Особенности характера износа валков и его влияние на качество профилей высокой жесткости // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: междунар. сб. науч. тр. / под ред. В.М.Салганика. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И.Носова, 2014. Вып.20. С. 283–290.
3. Шемшурова Н.Г. О расчете поперечной деформации металла при профилировании / Изв. вузов. Черная металлургия, 1995. №12. С. 25–28.
4. Совершенствование калибровок валков для производства гофрированных профилей в условиях ОАО «ММК» / М.Ф. Сафронов, Н.Г. Шемшурова, В.Л. Корнилов и др. // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: сб. науч. тр. аспирантов и соискателей. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И.Носова, 2000. С. 208–215.
5. Shemshurova N.G., Urmatskikh A.V., Lokotunina N.M. Organizing the Production of High-Rigidity Special Sections at the Magnitogorsk Metallurgical Combine // Metallurgist. Vol. 58, iss. 7 (2014), pp. 689–693.
6. Производство и эксплуатация валков на металлургическом предприятии / Сафронов М.Ф., Антипанов В.Г., Рашников В.Ф., Афанасьев В.Ф., Корнилов В.Л., Гун Г.С., Шемшурова Н.Г. // Валковый инструмент для производства гнутых профилей. Магнитогорск, 1999. Т. 4.
7. 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.
8. Metallurgy qualimetry theory design and development / Gun G.S., Rubin G.Sh., Chukin M.V., Gun I.G., Mezin I.Yu., Korchunov A.G. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. №5(45). С. 67–69.
9. 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.
10. Брялин М.Ф., Колокольцев В.М., Гольцов А.С. Повышение эксплуатационных свойств отливок из жароизносостойких хромомарганцевых чугунов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2007. №4. С. 22–25.
11. Колокольцев В.М., Петроченко Е.В., Воронков Б.В. Комплексно-легированные белые износостойкие чугуны. Челябинск, 2005.
12. Урмацких А.В., Шемшурова Н.Г. Совершенствование конструкции и развитие технологии производства гнутых профилей повышенной жесткости // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2007. № 1. С. 67–70.
13. ГОСТ 23554.1. Система управления качеством продукции. Экспертные методы оценки качества промышленной продукции. Организация и проведение экспертной оценки качества продукции. М., 2014.
14. Совершенствование калибровки валков для производства гнутых неравнополочных швеллеров / С.А. Тулупов, Н.Г. Шемшурова, В.Г. Антипанов и др. // Бюл. НТИ. Черная металлургия. 1984. Вып. 5. С. 59–60.
15. Шемшурова Н.Г. Особенности характера износа валков при формовке несимметричных гнутых профилей // Актуальные проблемы современной науки: сб. статей Междунар. науч.-практ. конф. (13–14 декабря 2013, г. Уфа). В 4 ч. Уфа: РИЦ БашГУ, 2013. Ч. 4. С. 279–282.
16. Пат. 2113927 РФ, МКИ B21D 5/06. Способ производства профилей высокой жесткости / В.Г. Антипанов, М.Ф. Сафронов, В.Л. Корнилов и др. Оpubл. 27.06.1998.
17. Пат. 965546 SU, МКИ B21D 5/06. Способ изготовления листов с гофрами жесткости / Р.Х. Валеев, В.Е. Дырда, В.Г. Антипанов и др. Оpubл. 15.10.1982. Б.И. № 38 (53).
18. А.с. 1174119 СССР. Валки для формовки локальной вытяжкой / В.Г. Антипанов, Н.Г.Шемшурова, С.А.Тулупов и др. Б.И.1985, № 31.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

IMPROVING THE ROLL PASS DESIGN OF ROLL FORMING MILLS

Shemshurova Nina Georgievna – Ph.D. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: ybitut85@mail.ru.

Kornilov Vladimir Leonidovich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Head of the Metallurgical Technology Department, Personal Corporate Personnel Training Centre, Magnitogorsk, Russia. E-mail: kadry@mmk.ru.

Antipanov Vadim Grigorevich – Ph.D. (Eng.), Magnitogorsk, Russia.

Abstract. This paper determines rational roll pass design principles for producing different types of formed sections. Such principles contribute to the adjustment of an initial design by increasing efficiency of its use and a formal characterization of a search for an improved technical solution. This method can be used for automated scientifically-based calculations of the roll pass design.

Keywords: Principles for the development of the roll pass design, formed sections, corrugated sections, high stiffness sections.

References

1. Tulupov S.A., Shemshurova N.G., Antipanov V.G. and others. Study of wear of rolls of roll forming mills. *Stal'* [Steel]. 1985, no. 6, pp. 56-58.
2. Shemshurova N.G., Antipanov V.G., Khachin D.V. Features of a nature of roll wear and its effect on the quality of high stiffness sections. *Modelirovanie i razvitie protsessov obrabotki metallov davleniem: mezhdunarodnyj sbornik nauchnykh trudov* [Modeling and development of metal forming processes. An international collection of research papers]. Edited by Salganik V.M. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2014, vol. 20, pp. 283-290.
3. Shemshurova N.G. On calculation of the transverse deformation of metal during its roll forming. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy]. 1995, no. 12, pp. 25-28.
4. Safronov M.F., Shemshurova N.G., Kornilov V.L. and others. Improving the roll pass design for the production of corrugated sections at OJSC MMK. *Modelirovanie i razvitie protsessov obrabotki metallov davleniem: sbornik nauchnykh trudov aspirantov i soiskatelej* [Modeling and development of metal forming processes: Collection of research papers presented by PhD students and applicants]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2000, pp. 208-215.
5. Shemshurova N.G., Urmatskikh A.V., Lokotunina N.M. Organizing the production of high-rigidity special sections at the Magnitogorsk Metallurgical Combine. *Metallurg* [Metallurgist]. vol. 58, iss. 7 (2014), pp. 689-693.
6. Safronov M.F., Antipanov V.G., Rashnikov V.F., Afanasiev V.F., Kornilov V.L., Gun G.S., Shemshurova N.G. Manufacturing and operation of rolls at a metallurgical plant. Rolls to manufacture formed sections. Magnitogorsk, 1999, vol. 4.
7. Rubin G.Sh., Chukin M.V., Gun G.S., Zakirov D.M., Gun I.G. Development of a theory of qualimetry for metalware. *Ferrous metals*, 2012, no. 7, pp.15-20.
8. Metallurgy qualimetry theory design and development / Gun G.S., Rubin G.Sh., Chukin M.V., Gun I.G., Mezin I.Yu., Korchunov A.G. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2013, no. 5(45), pp. 67-69.
9. Gun G.S., Mezin I.Yu., Korchunov A.G., Chukin M.V., Gun I.G., Rubin G.Sh. Scientific school of Magnitogorsk State Technical University on products and process quality management. *Quality in material processing*, 2014, no. 1, pp. 5-9.
10. Bryalin M.F., Kolokoltsev V.M., Goltsov A.S. Increasing performance properties of heat-and wear-resistant chromium-manganese iron castings. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2007, no. 4, pp. 22-25.
11. Kolokol'tsev V.M., Petrochenko E.V., Voronkov B.V. Kompleksno-legirovannyye belye iznosostojkie chuguny. Chelyabinsk, 2005.
12. Urmatskikh A.V., Shemshurova N.G. Improving a structure and development of the production technology of cold-formed sections with increased stiffness. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2007, no. 1, pp. 67-70.
13. GOST 23554.1. The system of quality control. Expert methods of assessing the quality of industrial products. Organization and carrying out expert evaluation of product quality. Moscow, 2014.
14. Tulupov S.A., Shemshurova N.G., Antipanov V.G. and others. Improving the roll pass design for the production of roll-formed unequal channels. *Byulleten' NTI. Chernaya metallurgiya* [Bulletin of scientific and technical information. Ferrous metallurgy]. 1984, iss. 5, pp. 59-60.
15. Shemshurova N.G. Features of character roll wear when forming asymmetrical bent profiles. *Aktual'nye problemy sovremennoj nauki: sbornik statej Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii (13-14 dekabrya 2013, g. Ufa)* [Actual problems of modern science: Sat. Articles of the International Scientific-Practical Conf. (13-14 Decem. 2013, Ufa)]. Ufa: RIC BSU, 2013, part 4, pp. 279-282.
16. Antipanov V.G., Safronov M.F., Kornilov V.L. and others. *Sposob proizvodstva profilej vysokoy zhestkosti* [A method of producing profile of high rigidity]. Patent no. 2113927, 1998.
17. Valeev A.D., Dyrda V.E., Antipanov V.G. and others. *Sposob izgotovleniya listov s goframi zhestkosti* [A method of manufacturing sheets with ribbed stiffness]. Patent no. 965546, 1982.
18. Antipanov V.G., Shemshurova N.G., Tulupov S.A. and others. *Valki dlya formovki lokal'noj vytyazhkoj* [The rolls are for forming with a local deformation]. Patent no. 1174119, 1985.

Шемшурова Н.Г., Корнилов В.Л., Антипанов В.Г. Совершенствование калибровок валков профилегибочных станов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №3. С. 58–63.

Shemshurova N.G., Kornilov V.L., Antipanov V.G. Improving the roll pass design of roll forming mills. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 3, pp. 58–63.

ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

УДК 621.762.4.04:621.78.061

ВЫБОР ПРЕССОВАННОЙ ЗАГОТОВКИ ДЛЯ ШТАМПОВКИ ПОКОВОК ИЗ ГРАНУЛ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Белокопытов В.И.

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

Аннотация. Осуществлена аналитическая оценка степени деформации сдвига, которой подвергается материал заготовки в процессе штамповки. Установлено наличие максимальных значений степени деформации сдвига в полотно и боковых стенках поковки, что приводит к появлению в гранулированном материале микронесплошностей в виде расслоений и отрицательно сказывается на механических свойствах изделий. Рекомендовано использовать в качестве заготовки под штамповку прессованный профиль прямоугольного поперечного сечения. Применение такой заготовки, обладающей пониженным уровнем анизотропии прочностных свойств, обеспечивает гарантированное соответствие механических свойств штампованных поковок требованиям технических условий.

Ключевые слова: гранулированные материалы, штампованные поковки, качество, механические свойства, структура, технология.

Введение

В последнее время в нашей стране и за рубежом интенсивно разрабатываются новые прогрессивные технологические процессы производства конструкционных материалов из гранул, получаемых диспергированием расплава с последующей кристаллизацией при большой скорости охлаждения [1]. Если вопросы структурообразования и фазовых превращений при литье гранул уже достаточно хорошо изучены, то проблеме консолидации гранул в компактное состояние, достижению устойчивого формообразования полуфабрикатов и формированию их нормированных свойств до настоящего времени не уделялось должного внимания [2]. По причине отсутствия научно обоснованных режимов горячей объемной штамповки гранул этим материалам оставались присущи существенные недостатки: неоднородность структуры, низкий уровень механических свойств и повышенная их анизотропия, развитое волокнистое строение макроструктуры и шиферный характер излома [3]. Поэтому актуальной является проблема создания новых схем

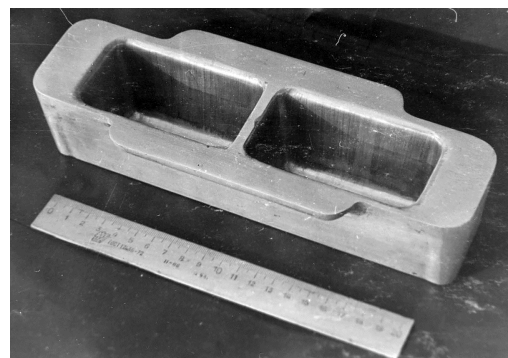
и режимов деформации, позволяющих получать изделия с однородной структурой и высокими эксплуатационными характеристиками [4]. При этом повышению эффективности использования таких материалов в объектах новой техники в значительной мере может способствовать прогнозирование анизотропии их свойств и разработка технологических процессов, приводящих к ее снижению.

Результаты исследований и их обсуждение

С целью повышения механических свойств поковок и снижения их анизотропии был осуществлен выбор прессованной заготовки и разработан технологический процесс получения из гранул сплава 01969 штампованной поковки типа «лонжерон» (рис. 1, а), имеющей габариты 107×175×1780 мм, с высотой ребер жесткости 95 мм и толщиной дна 12 мм. Конфигурация поковки соответствует пятой группе сложности. Сплав относится к высокопрочным алюминиевым сплавам системы Al–Zn–Mg–Cu [5]. Механические свойства поковок должны соответствовать техническим условиям, приведенным в табл. 1.



а



б

Рис. 1. Реальная (а) и модельная (б) штампованные поковки типа «лонжерон»

Таблица 1
Технические условия на механические свойства
поковок из гранул сплава 01969

Состояние поставки	Направление испытания	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %
Горячепрессованное	Продольное	220	320	10,0
	Поперечное	200	300	8,0
	Высотное	180	260	4,0
Термообработанное по режиму Т1	Продольное	600	650	6,0
	Поперечное	580	620	4,0
	Высотное	530	570	2,0

Термообработка по режиму Т1 включает закалку в воде с температуры $475 \pm 5^\circ\text{C}$ и последующее старение при $135 \pm 5^\circ\text{C}$ в течение 16 ч [6].

Традиционная технология штамповки поковок типа «лонжерон» предусматривала следующие операции:

- нагрев прессованной заготовки до температуры $420\text{--}470^\circ\text{C}$ в течение 2 ч;
- ковка;
- нагрев кововой заготовки толщиной 90 мм до температуры $420\text{--}470^\circ\text{C}$ в течение 1 ч;
- предварительная штамповка;
- обрезка облоя;
- травление;
- зачистка дефектов;
- нагрев до температуры $420\text{--}470^\circ\text{C}$;
- окончательная штамповка;
- обрезка облоя;
- травление;
- зачистка дефектов;
- травление;
- контроль механических свойств.

Из данных, представленных в табл. 2, видно, что механические свойства образцов, вырезанных из поковок в продольном направлении, соответствуют техническим условиям, а в поперечном и

высотном направлениях не отвечают им. Последнее, по-видимому, связано с применением в качестве заготовки под штамповку прессованного полуфабриката круглого поперечного сечения, характеризующегося повышенным уровнем анизотропии механических свойств и низким качеством схватывания гранул в поперечном направлении. Кроме того, использование высоких температур при штамповке приводит к интенсивному газовыделению по границам гранул, что ухудшает схватывание между ними и способствует протеканию необратимых процессов структурного изменения в объеме гранул, проявляющегося в распаде пересыщенного твердого раствора с последующим выделением избыточных фаз и их коагуляцией.

Таблица 2
Механические свойства штампованных поковок,
полученных по традиционной технологии [7]

Направление испытания	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %
Продольное	575	650	8,0
Поперечное	540	585	4,2
Высотное	410	450	1,8

Для изучения в лабораторных условиях влияния термомеханических параметров штамповки на механические свойства поковок и их анизотропию был изготовлен штамп, позволяющий получать изделия (рис. 1, б), близкие по конфигурации к поковкам типа «лонжерон» (см. рис. 1, а). Штамп был оснащен карбидо-кремниевыми нагревателями и установлен на гидравлическом прессе ПО 443 усилием 20 МН. Замер и регулирование температуры производили с помощью термопары, находящейся непосредственно у ручья штампа и подключенной к потенциометру. Механические свойства определяли на образцах, вырезанных в высотном 1а, 1б, 1в, продольном 2 и поперечном 3 направлениях согласно схеме на рис. 2.

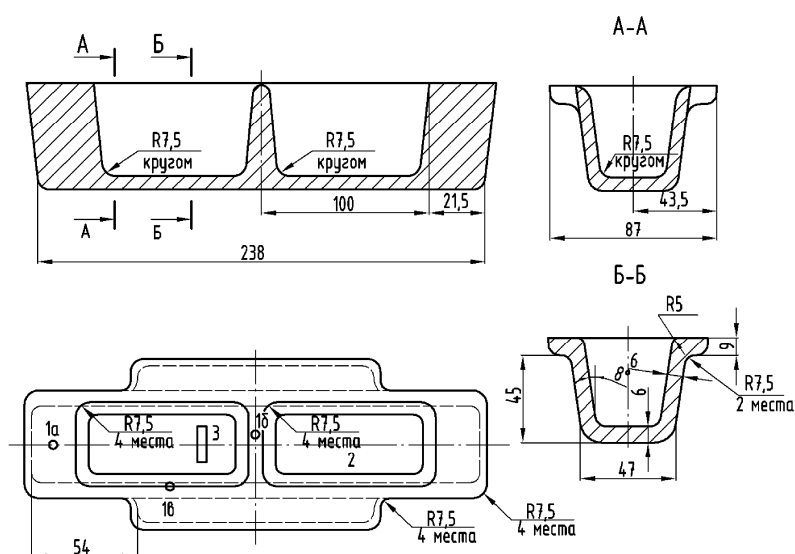


Рис. 2. Эскиз штампованной поковки типа «лонжерон»: 1 а, 1 б, 1 в, 2, 3 – схемы вырезки образцов

Заготовки с поперечным сечением в виде равнобедренной трапеции получали из прессованных с коэффициентом вытяжки $\lambda = 10$ профилей круглого и прямоугольного поперечных сечений. Нагрев заготовок до заданной температуры осуществляли в электрической печи в течение двух часов. Полученные поковки подвергали окончательной термообработке по режиму Т1.

Для оценки степени деформации сдвига, которой подвергается материал в процессе штамповки, и расчета поля тензора деформации в местах вырезки образцов (см. рис. 2) использовали метод делительных сеток [8]. Делительную (координатную) сетку, состоящую из взаимно перпендикулярных линий, наносили на внутреннюю поверхность разрезанных вдоль оси симметрии заготовок с шагом 3 мм. Нанесение сетки осуществляли на координатно-расточном станке с точностью до 0,01 мм. Деформированную делительную сетку подвергали обмеру на инструментальном микроскопе БМИ – 1Ц. При получении поковки фиксировали начальную $\varepsilon = 44\%$, промежуточную $\varepsilon = 67\%$ и конечную $\varepsilon = 86\%$ стадии деформирования.

При нанесении координатной сетки на плоскость действия главных деформаций круг, вписанный в квадратную ячейку сетки, преобразуется в результате деформации в эллипс, а сама ячейка в параллелограмм. Главные полуоси эллипса определяли следующим образом [9]:

$$r_{1,2} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{a_1^2 + b_1^2}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{a_1^2 + b_1^2}{2}\right)^2 - a_1^2 b_1^2 \sin^2 \alpha}}, \quad (1)$$

где a_1 и b_1 – размеры ячейки после деформации; α – угол между сопряженными диаметрами, соединяющими точки касания эллипса со сторо-

нами параллелограмма.

Компоненты тензора деформации в локальной системе координат находили по уравнениям:

$$U_1 = \frac{r_1}{r_0}; \quad U_2 = \frac{r_2}{r_0}; \quad U_3 = \frac{1}{U_1 U_2}. \quad (2)$$

Степень деформации сдвига (с учетом условия несжимаемости) определяли по выражению [10]

$$\Lambda = 2 \sqrt{(\ln U_1)^2 + (\ln U_2)^2 + (\ln U_1 \ln U_2)}. \quad (3)$$

Изменение степени деформации сдвига по высоте поковки в ее характерных сечениях для начальной, промежуточной и конечной стадий процесса показано на рис. 3–5. Как видно из графиков, степень деформации сдвига возрастает с увеличением степени обжатия заготовок. При этом на всех стадиях процесса наблюдается неравномерность деформации по сечениям поковки. Наибольшая неравномерность деформации имеет место в крайнем сечении (торец поковки), что является следствием малой деформации средней части торца поковки и резкого увеличения степени деформации сдвига в верхней части сечения при истечении металла в облой.

На конечной стадии деформирования степень деформации сдвига в ребре $\Lambda \approx 2$ и остается практически постоянной по всей его высоте (см. рис. 5). Максимальное значение степени деформации сдвига отмечается в полотно и боковых стенках поковки, где $\Lambda = 4$ и более, что несколько ниже критической степени деформации сдвига при испытаниях на кручение прессованной из гранул сплава 01969 заготовки круглого сечения в продольном и выше чем в поперечном направлении (рис. 6).

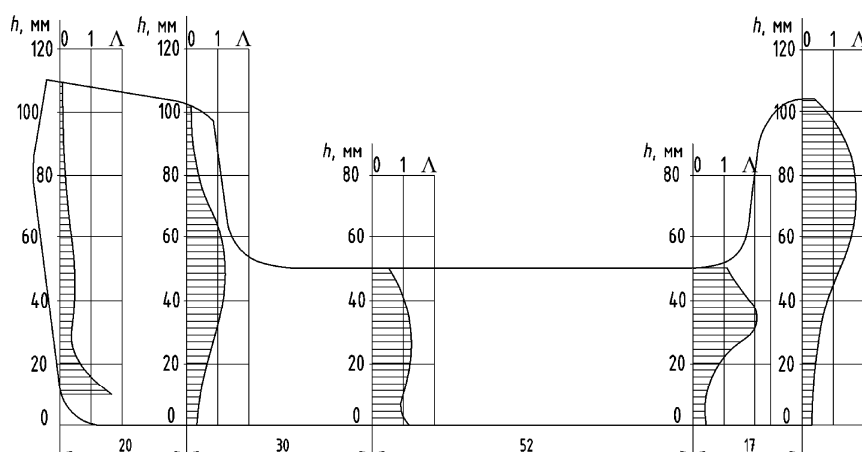


Рис. 3. Распределение степени деформации сдвига по сечению поковки на начальной стадии деформирования ($\varepsilon = 44\%$)

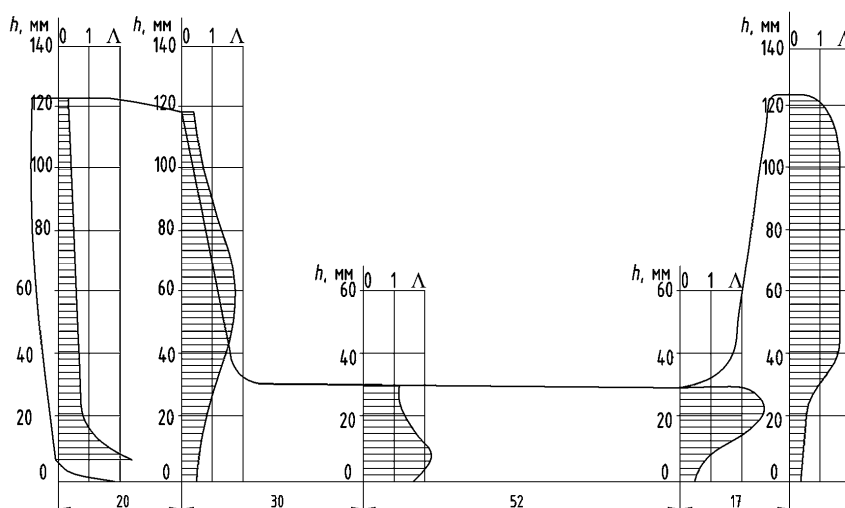


Рис. 4. Распределение степени деформации сдвига по сечению поковки на промежуточной стадии деформирования ($\varepsilon = 67\%$)

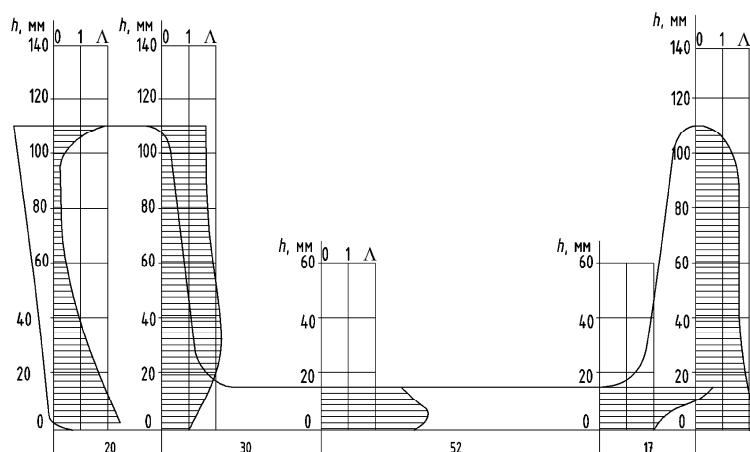


Рис. 5. Распределение степени деформации сдвига по сечению поковки на конечной стадии деформирования ($\varepsilon = 86\%$)

Поскольку оформление боковых стенок поковки происходит за счет деформации заготовки в поперечном направлении, то превышение степени деформации сдвига, соответствующей разрушению, может привести к появлению в гранулированном материале микронесплошностей в виде расслоений, что отрицательно сказывается на механических свойствах изделий.

С этой точки зрения, более предпочтительным является использование в качестве заготовки прессованной полосы прямоугольного сечения, так как для нее характерны высокие предельные степени деформации сдвига в поперечном направлении (рис. 7), достигающие $\Lambda_p=5,5$ при температуре испытания $340-350^\circ\text{C}$ и интенсивности скоростей деформации сдвига $H=5\cdot 10^{-2}-1\cdot 10^{-1}\text{ с}^{-1}$. Кроме того, прессованные полуфабрикаты прямоугольного поперечного сечения, полученные при плоской схеме прессования, обладают пониженным уровнем анизотропии прочностных свойств (табл. 3).

Временное сопротивление разрыву в продольном $\sigma_B^{\text{пр}}$ и поперечном $\sigma_B^{\text{п}}$ направлениях и анизотропия прочностных свойств горячепрессованных с коэффициентом вытяжки 10 полуфабрикатов, определенная экспериментально $(\sigma_B^{\text{п}}/\sigma_B^{\text{пр}})_9$ и рассчитанная аналитически $(\sigma_B^{\text{п}}/\sigma_B^{\text{пр}})_T$ [11], представлены в табл. 3.

В табл. 4 приведены значения механических свойств термообработанных образцов, вырезанных из поволоков согласно схеме на рис. 2. Заготовки с поперечным сечением в виде равнобедренной трапеции были получены из прессованных полуфабрикатов круглого и прямоугольного поперечного сечения. Температура нагрева штампа и заготовки составляла 350°C , скорость перемещения траверсы пресса $v_0=0,18\text{ мм/с}$.

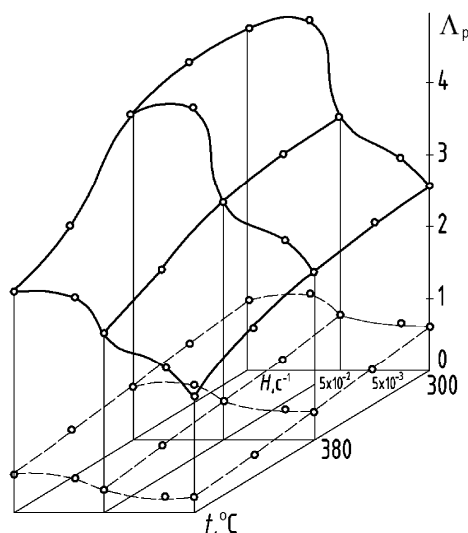


Рис. 6. Диаграмма пластичности в продольном (—) и поперечном (---) направлениях прессованного профиля круглого сечения из гранул сплава 01969, полученная при испытаниях на кручение

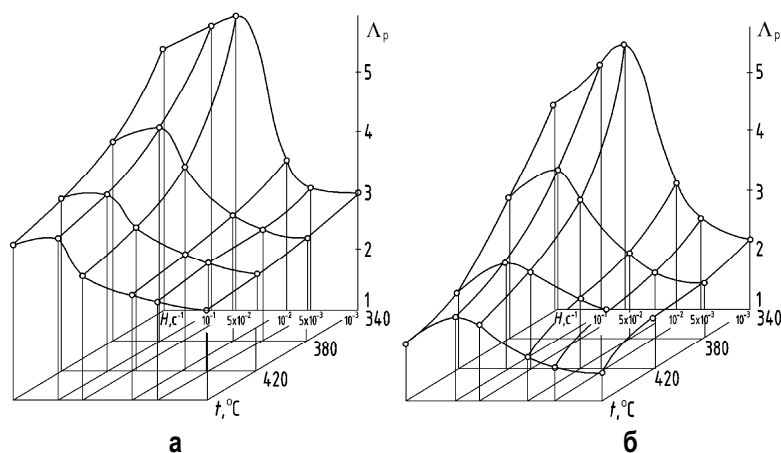


Рис. 7. Диаграмма пластичности в продольном (а) и поперечном (б) направлениях прессованного профиля прямоугольного сечения из гранул сплава 01969, полученная при испытаниях на кручение

Таблица 3
Временное сопротивление разрыву в продольном и поперечном направлениях и анизотропия прочностных свойств прессованных полуфабрикатов

Форма поперечного сечения полуфабриката	$\sigma_B^п$, МПа	$\sigma_B^{пр}$, МПа	$(\sigma_B^п / \sigma_B^{пр})_3$	$(\sigma_B^п / \sigma_B^{пр})_T$
Круг	265±5	330±5	0,78–0,85	0,72
Прямоугольник	315±5	325±5	0,94–1,00	1,00

Таблица 4
Значения механических свойств поковок, полученных из прессованных полуфабрикатов круглого и прямоугольного сечения

Форма поперечного сечения полуфабриката	Механические свойства	Номер образца				
		1а	1б	1в	2	3
Круг	$\sigma_{0,2}$, МПа	530	530	545	600	550
	σ_B , МПа	575	575	590	660	595
	δ , %	2,5	2,5	3,0	6,8	4,4
Прямоугольник	$\sigma_{0,2}$, МПа	550	560	605	640	610
	σ_B , МПа	590	600	645	675	650
	δ , %	2,4	2,5	3,5	7,2	4,2

Заключение

Результаты исследований, представленные в табл. 4, показывают, что применение прессованного профиля с прямоугольным поперечным сечением в качестве заготовки под штамповку позволяет значительно повысить механические свойства поковок в высотном (1в), продольном (2) и поперечном (3) направлениях. Кроме того, использование такой заготовки обеспечивает

гарантированное соответствие механических свойств штампованных поковок требованиям технических условий.

Список литературы

1. Гарибов Г.С. Металлургия гранул – основа создания перспективных авиационных двигателей // Технология легких сплавов. 2007. № 1. С. 66–78.
2. Конкевич В.Ю., Лебедева Т.И. Развитие металловедения гранулируемых алюминиевых сплавов и технологии их производства // Технология легких сплавов. 2013. № 4. С. 113–123.
3. Полькин Е.С. Перспективы развития гранульной металлургии титановых сплавов // Технология легких сплавов. 2011. № 4. С. 5–10.
4. Осинцев О.Е., Конкевич В.Ю. Высокопрочные быстрозакристаллизованные алюминиевые сплавы систем Al – Zn – Mg и Al – Zn – Mg – Cu // Технология легких сплавов. 2010. № 1. С. 157–163.
5. Осинцев О.Е., Конкевич В.Ю. О роли основных компонентов и переходных металлов в высокопрочных быстрозакристаллизованных сплавах системы Al – Zn – Mg – Cu // Технология легких сплавов. 2014. № 2. С. 57–64.
6. Кинематика старения гранулированных алюминиевых сплавов 01969 и 01995 / В.Н. Мироненко [и др.] // Тезисы докладов II Всесоюзной конференции по металлургии гранул. М.: ВЛС, 1987. С. 133–134.
7. Оптимизация параметров штамповки гранулированных алюминиевых сплавов на основе исследования их реологических характеристик / Н.В. Шепельский [и др.] // Тезисы докладов II Всесоюзной конференции по металлургии гранул. М.: ВЛС, 1987. С. 130–132.
8. Смирнов-Аляев Г.А., Чикидовский В.П. Экспериментальные методы в обработке металлов давлением. Л.: Машиностроение, 1972. 360 с.
9. Чиченев Н.А., Кудрин А.Б., Полухин П.И. Методы исследования процессов обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1977. 311 с.
10. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1986. 688 с.
11. Шепельский Н.В., Корнилов В.Н., Белокопытов В.И. Аналитическое прогнозирование анизотропии сопротивления разрушению прессовок из сферических порошков // Порошковая металлургия. 1990. № 1. С. 62–65.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

SELECTING BLANKS FOR STAMPING FORGINGS FROM PELLETS OF ALUMINUM ALLOYS

Belokopytov Vasily Ivanovich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. Phone: +7 (391) 294-23-28. E-mail: VBelokopytov@sfu-kras.ru.

Abstract. This paper presents an analytical evaluation of the degree of shear strain during stamping of blanks. Maximum values of the degree of shear strain were established in the horizontally stamped thin wall and sidewalls of the forging, which resulted in micro-discontinuities in the form of laminations in the granulated material and adversely affected mechanical properties of products. It is recommended to use extruded rectangular cross-sectional profiles as a blank for stamping. Such blanks, having a reduced level of anisotropy of strength properties, provides for a guaranteed compliance of mechanical properties of forgings with technical requirements.

Keywords: Granulated materials, forgings, quality, mechanical properties, structure, technology.

References

1. Garibov G.S. Metallurgy of granules – the basis of the creation of advanced aircraft engines. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of light alloys]. 2007, no. 1, pp. 66-78.
2. Konkevich V.Yu., Lebedeva T.I. The development of material science of granulated aluminum alloys and their production technology. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of light alloys]. 2013, no. 4, pp. 113–123.
3. Polkin E.S. Prospects of development of pellet metallurgy of titanium alloys. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of light alloys]. 2011, no. 4, pp. 5–10.
4. Osintsev O.E., Konkevich V.Yu. High-strength rapidly crystallized aluminum alloys of Al – Zn – Mg and Al – Zn – Mg – Cu systems. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of light alloys]. 2010, no. 1, pp. 157–163.

5. Osintsev O.E., Konkevich V.Yu. On the role of main components and transition metals in high-strength rapidly crystallized Al – Zn – Mg – Cu alloys. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of light alloys]. 2014, no. 2, pp. 57–64.
6. Mironenko V.N. et al. Kinematics of aging of granular aluminum alloys 01969 and 01995. *Tezisy dokladov II Vsesoyuznoj konferentsii po metallurgii granul* [Abstracts of papers presented at the 2nd All-Union Conference on Metallurgy of Granules]. Moscow: VILS, 1987, pp. 133–134.
7. Shepelskiy N.V. et al. Optimization of stamping parameters for granular aluminum alloys based on a study of their rheological properties. *Tezisy dokladov II Vsesoyuznoj konferentsii po metallurgii granul* [Abstracts of papers presented at the 2nd All-Union Conference on Metallurgy of Granules]. Moscow: VILS, 1987, pp. 130–132.
8. Smirnov-Alyayev G.A., Chikidovskiy V.P. *Ehksperimental'nye metody v obrabotke metallov davleniem* [Experimental methods in metal forming]. Leningrad: Mechanical Engineering, 1972, 360 p.
9. Chichenev N.A., Kudrin A.B., Polukhin P.I. *Metody issledovaniya protsessov obrabotki metallov davleniem* [Research methods for metal forming processes]. Moscow: Metallurgy, 1977, 311 p.
10. Kolmogorov V.L. *Mekhanika obrabotki metallov davleniem* [Mechanics of metal forming]. Moscow: Metallurgy, 1986, 688 p.
11. Shepelskiy N.V., Kornilov V.N., Belokopytov V.I. Analytical prediction of the anisotropy of the fracture strength of compacts from spherical powders. *Poroshkovaya metallurgiya* [Powder metallurgy]. 1990, no. 1, pp. 62–65.

Белокopyтов В.И. Выбор прессованной заготовки для штамповки поковок из гранул алюминиевых сплавов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №3. С. 64–70.

Belokopytov V.I. Selecting blanks for stamping forgings from pellets of aluminum alloys. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 3, pp. 64–70.

УДК 669.784: 519.87

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПИРОЛИЗА ПРИ ПРОКАЛКЕ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Герасименко Т.Е., Мешков Е.И., Чибашвили А.В.

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

Аннотация. Представлены результаты идентификации математических моделей отгонки летучих веществ из четырёх основных типов углеродных материалов в условиях квазистатического процесса прокалики. Определены адекватные величины коэффициентов и энергий активации функций выхода летучих веществ. Показана возможность прогнозирования выделения летучих веществ в промышленных печах.

Ключевые слова: углеродные материалы, прокалика, квазистатический режим, летучие вещества, пиролиз, математическая модель, энергия активации, идентификация, интегральная и дифференциальная функции распределения.

Введение

Прокаливание углеродных материалов является одним из основных процессов в электродном производстве, поскольку во многом определяет качественные показатели готовой продукции. При нагревании углеродных материалов протекает комплекс сложных физико-химических превращений, в том числе выделение газообразных летучих веществ в результате пиролиза органических соединений. Моделирование этих процессов имеет большое значение для исследования и совершенствования процесса прокалики вычислительным экспериментом.

Теоретические основы пиролиза органики в процессе термообработки углеродного сырья рассмотрены в работах [1–4]. Известно [5, 6], что в результате пиролиза органики при температурах свыше 600°C образуются в основном газообразные продукты, содержащие кроме насыщенных и ненасыщенных углеводородов неорганические соединения (H_2 , N_2 , H_2O , CO , CO_2).

Целью настоящей статьи является разработка

аналитических выражений, описывающих зависимость выхода летучих веществ от температуры термообработки различных типов углеродных материалов. Эти выражения в дальнейшем использованы в составе комплексной математической модели прокалики углеродных материалов в барабанной вращающейся печи, а модель учитывает совокупность определяющих условий и протекающих в печи процессов, в том числе отгонку и горение летучих веществ.

Разрабатываемые математические модели пиролиза обеспечат возможность расчёта распределения по длине печи: выхода летучих веществ, тепловых потоков от их горения и, в конечном итоге, температурного поля и показателей прокалики.

Методы исследования

Для разработки математических моделей отгонки летучих веществ во время прокалики различных углеродных материалов использованы данные квазистатического объёмного выхода продуктов термического разложения [7]. В этой работе исследованы четыре основных типа угле-

родного сырья: первый – антрацит «старый» (донецкий), второй – антрацит «молодой» (листьянский), третий – нефтяной кокс крекинговый (Грозный) и четвёртый – пиролизный нефтяной кокс (Москва). Экспериментальные данные [7] плотности распределения объёмного выхода летучих веществ (v) приведены на рис. 1 и 2.

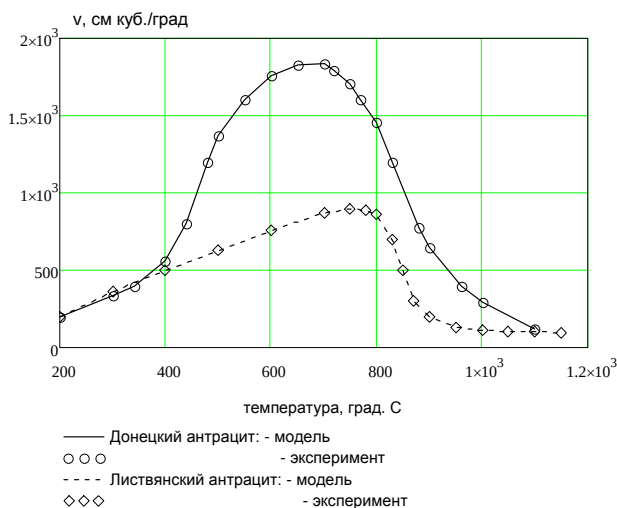


Рис. 1. Экспериментальные данные и модели плотности распределения выхода летучих веществ из антрацитов

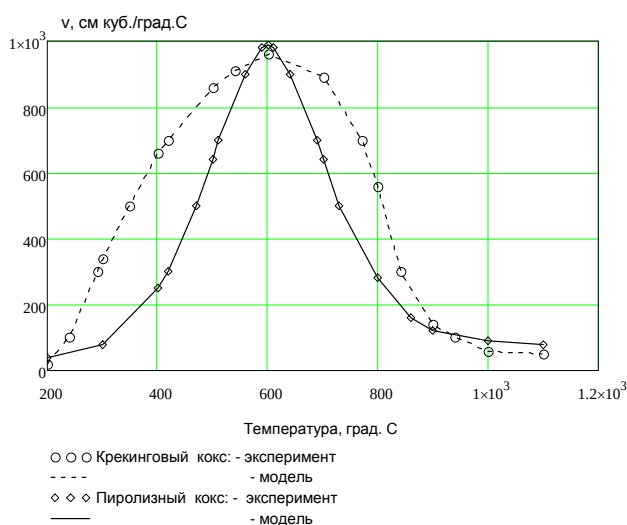


Рис. 2. Экспериментальные данные и модели плотности распределения выхода летучих веществ из нефтяных коксов

С целью компьютерной обработки этих данных и описания их аналитически дифференциальными функциями распределения в зависимости от температуры вида $v=f(t)$ использована встроенная в программу Mathcard 15 функция кубической сплайн-интерполяции. Результат та-

кой аппроксимации, подтверждающей полную адекватность полученных модельных аналитических зависимостей экспериментальным данным, также показан на рис. 1 и 2.

Результаты исследования и их обсуждение

Высокая сходимость модельных и экспериментальных значений плотности распределения выхода летучих веществ даёт нам право использовать для построения интегральных функций выхода летучих веществ $V=F(T)$ первые значения в качестве исходных (экспериментальных) данных. Интегрированием модельных дифференциальных функций $v=f(t)$ получены функции распределения $V=F(T)$ для перечисленных типов сырья. График такой функции приведён на рис. 3, на котором (и последующих рисунках) за 100% принят максимальный выход летучих веществ.

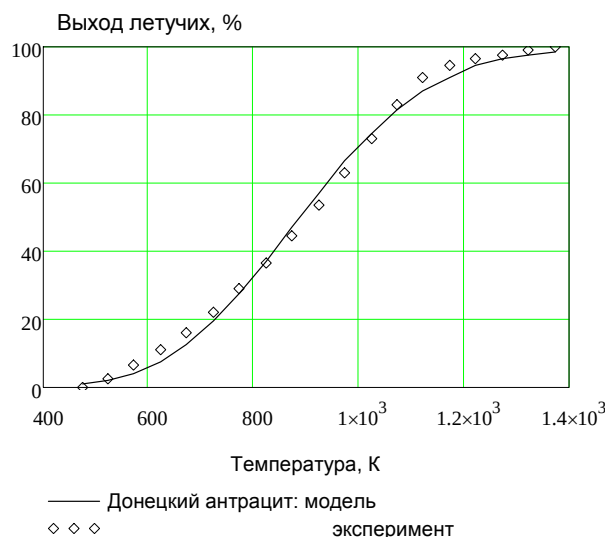


Рис. 3. Интегральные функции распределения выхода летучих веществ на примере донецкого антрацита (однокомпонентная схема)

При практическом моделировании процессов отгонки летучих веществ используются одно- и двухкомпонентные схемы [8]. Однокомпонентная схема предполагает, что летучие вещества имеют постоянные физико-химические параметры во всём температурном диапазоне. При двухкомпонентной схеме летучие вещества разделяют на две фракции, имеющие отличающиеся физико-химические параметры и выделяющиеся в разных температурных диапазонах. Кинетическое уравнение для расчёта выхода летучих веществ по однокомпонентной схеме в результате пиролиза имеет вид [8]

$$V(T, k_0, E, \tau) = V_m \left\langle 1 - \exp \left\{ -k_0 \exp \left[-E / (RT / \mu) \right] \tau \right\} \right\rangle, \quad (1)$$

где V – объёмный выход летучих веществ, %; T – температура пиролиза, К; k_0 – предэкспоненциальный коэффициент в уравнении Аррениуса, с^{-1} ; E – энергия активации, кДж/кмоль; τ – время, с; V_m – максимальный объёмный выход летучих веществ, соответствующий их начальной массе в прокаливании материале, %; $R=8,31$ кДж/(град·кмоль); μ – молекулярная масса летучих веществ, кг/кмоль.

Молекулярная масса ($\mu=46,84$) рассчитана по данным [8] как средневзвешенная величина с учётом молекулярных масс каждого летучего вещества (смола, вода разложения, CO , CO_2 , C_2H_4 , CH_4 , H_2) и объёмного содержания их в общей смеси.

В случае квазистатических условий пиролиза, когда лимитирующей стадией является подвод тепла и фактор времени не оказывает влияния на процесс, это уравнение можно записать следующим образом [9]:

$$V(T, k, E) = V_m \left\langle 1 - \exp \left\{ -k \cdot \exp \left[-E / (RT / \mu) \right] \right\} \right\rangle, \quad (2)$$

где $k = k_0 \tau_k$, а τ_k – время завершения пиролиза.

С целью определения параметров уравнения (2) – k и E – выбран метод решения задачи оптимизации, заключающийся в поиске минимума значения целевой функции, в качестве которой использована функция

$$F(k, E) = \sum_{i=1}^n (V_i - V(T_i, k, E))^2, \quad (3)$$

где V_i – экспериментальное значение выхода летучих веществ; n – количество экспериментальных и расчётных значений V , используемых для решения задачи оптимизации.

Эта функция определяет сумму квадратов отклонений экспериментальных и модельных значений выхода летучих веществ, рассчитанных по уравнению (2). Оптимальные значения k и E , при которых обеспечен минимум значения целевой функции, найдены для всех видов углеродного сырья с применением встроенной в программу Mathcad 15 функции Minerr(x,y) при $n=18$ и приведены в таблице. Графики эксперимен-

тальных и модельных интегральных функций ($V(T, k, E)$), построенных при $V_m=100\%$ по уравне-

нию (2) с использованием оптимальных значений k и E , приведены на рис. 3.

Результаты проверки соответствия полученных данных с использованием однокомпонентной схемы показали, что экспериментальные и модельные функции для всех типов сырья адекватны с доверительной вероятностью 0,99, расчётное значение критерия Фишера ($F_{рас}$) значительно больше табличного ($F_{таб}=3,34$), а остаточная дисперсия не превышает 6,7 (см. таблицу).

Данные идентификации функции выхода летучих веществ

Тип сырья	Однокомпонентная схема				Двухкомпонентная схема					
	k	E	$D_{осм}$	$F_{рас}$	k_1	E_1	k_2	E_2	$D_{осм}$	$F_{рас}$
1	120,8	812,7	6,628	200,7	64,01	490,0	67000	6300	0,199	6670
2	286,7	986,8	0,704	2067	148,5	632,0	3375	4581	0,190	7644
3	212,7	872,0	1,005	1453	253,2	623,7	4020	4654	0,429	3401
4	630,0	1073	3,852	410,4	205,4	683,6	23000	6010	0,225	7027

Процесс выделения летучих веществ можно моделировать точнее по двухкомпонентной схеме с использованием следующего уравнения:

$$V(T, k_1, k_2, E_1, E_2) = V_m \left\langle \alpha \left\{ 1 - \exp \left[-k_1 \cdot \exp \left[\frac{-E_1}{R_1 / \mu_1 T} \right] \right] \right\} + (1 - \alpha) \left\{ 1 - \exp \left[-k_2 \cdot \exp \left[\frac{-E_2}{R_2 / \mu_2 T} \right] \right] \right\} \right\rangle, \quad (4)$$

где индексы 1 и 2 относятся к первому и второму компоненту летучих веществ; α – объёмная доля первого компонента.

Значения средневзвешенных молекулярных масс определены расчётом по данным [8]: для первого – низкотемпературного компонента, состоящего из смолы, воды разложения и CO_2 , $\mu_1=62,76$, а для второго – высокотемпературного компонента, состоящего из CO , C_2H_4 , CH_4 , H_2 , $\mu_2=15,17$. При таком составе с учётом объёмной концентрации компонент летучих веществ $\alpha=0,665$.

Целевая функция для идентификации уравнения (4) имеет вид

$$F(k_1, k_2, E_1, E_2) = \sum_{i=1}^n (V_i - V(T_i, k_1, k_2, E_1, E_2))^2. \quad (5)$$

Задача идентификации параметров (k_1, k_2, E_1, E_2) уравнения (4) для исследованных типов сырья решена с использованием экспериментальных значений распределения выхода летучих веществ и функции $\text{Miner}(x, y)$. Оптимальные значения этих параметров и данные проверки их адекватности приведены в таблице. Они подтверждают, что модель значима с доверительной вероятностью 0,99, но расчетные значения критерия Фишера при $F_{\text{таб}} = 3,59$ значительно выше, а остаточная дисперсия на порядок ниже, чем в случае применения однокомпонентной схемы.

Полученные данные позволяют моделировать распределение и плотность распределения выхода летучих веществ отдельно по отдельным компонентам. Интегральные функции распределения выхода летучих веществ отдельных компонентов выражаются уравнениями:

$$V_1(T) = V_m \alpha \left\{ 1 - \exp \left[-k_1 \cdot \exp \left[\frac{-E_1}{R_1 / \mu_1 T} \right] \right] \right\}; \quad (6)$$

$$V_2(T) = V_m (1 - \alpha) \left\{ 1 - \exp \left[-k_2 \cdot \exp \left[\frac{-E_2}{R_2 / \mu_2 T} \right] \right] \right\}. \quad (7)$$

Графики этих функций и функций общего выхода летучих веществ, экспериментальные и построенные по значениям, рассчитанным с оптимальными значениями параметров идентификации, изображены на **рис. 4**. Хорошее совпадение графиков общего выхода летучих веществ и результаты проверки адекватности полученных данных подтверждают, что двухкомпонентная схема расчёта выделения летучих веществ при прокатке углеродных материалов позволяет с высокой точностью моделировать этот процесс в промышленных печах, в которых скорость нагрева материала соответствует квазистатическим условиям.

С целью моделирования выхода летучих веществ по длине барабанной вращающейся печи, работающей в режиме противотока газа и прокаливаемого антрацита, использованы данные [10] распределения его температуры ($t_m = f(x)$, где x – расстояние от горячей головки печи) и разработанные нами математические модели функций $V(T)$, $V_1(T)$ и $V_2(T)$ (см. **рис. 4**).

После замены переменной этих функций T на независимую переменную x и дифференцирования получены дифференциальные функции распределения выхода летучих веществ в зависимости от расстояния x . Графики этих функций, совмещённые с графиком распределения температуры материала, показаны на **рис. 5**.

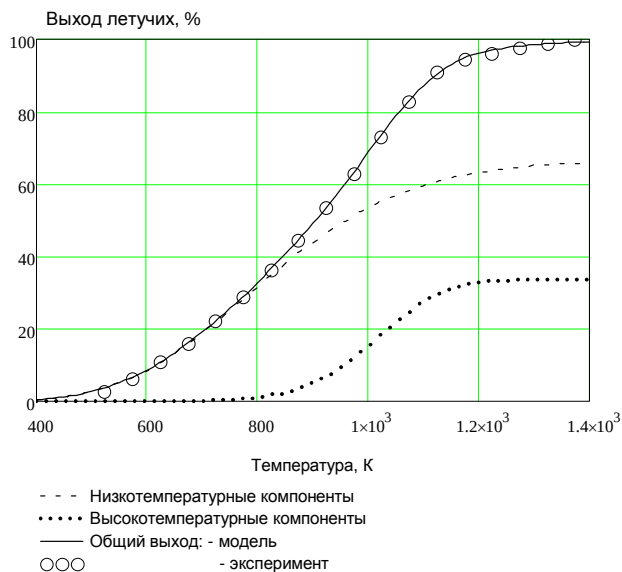


Рис. 4. Интегральные функции распределения выхода летучих веществ на примере донецкого антрацита (двухкомпонентная схема)

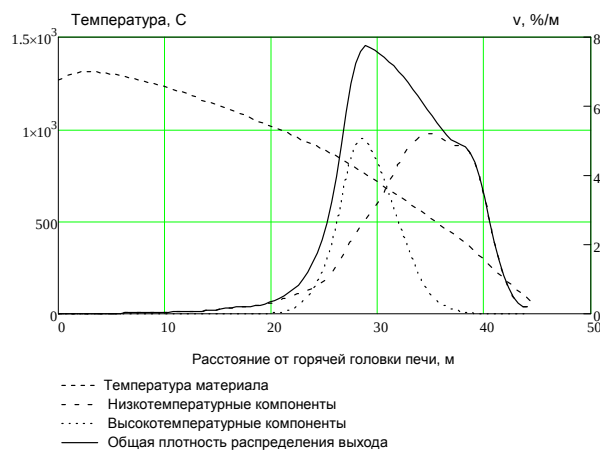


Рис. 5. Распределение температуры и дифференциальные кривые выхода летучих веществ в барабанной вращающейся печи на примере донецкого антрацита

Выводы

Выполненные исследования показывают, что использованная методология моделирования и разработанные математические модели обеспечивают для летучих веществ в целом и их отдельных компонентов возможность определения места выделения в печи, расчёта их количества и организации рационального сжигания в печах прокатки углеродных материалов. По экспериментальным данным рассчитаны адекватные значения коэффициентов уравнений и энергий активации пиролиза в процес-

се прокали в квазистатических условиях четырёх типов углеродного сырья. Применение полученных оптимальных параметров и функций распределения выхода летучих веществ в комплексных моделях технологических процессов и тепловой работы печей повысит их точность и информативность.

Список литературы

1. Химия и переработка угля / под ред. В.Г. Липовича. М.: Химия, 1988. 336 с.
2. Гориславец С.П., Тменов Д.Н., Майоров В.И. Пиролиз углеводородного сырья / АН УССР, Ин-т газа. Киев: Наук. думка, 1977. 307 с.
3. Пиролиз углеводородного сырья / Т.Н. Мухина, Н.Л. Барабанов, С.Е. Бабаши др. М.: Химия, 1987. 238 с.
4. Химическая технология твёрдых горючих ископаемых: учебник для вузов / под ред. Г.Н. Макарова и Г.Д. Харламповича. М.: Химия, 1986. 496 с.
5. Чирков В.Г., Вайнштейн Э.Ф. Влияние скорости достижения заданной температуры на химический состав продуктов реакции и энергетические характеристики процесса пиролиза органических материалов // Доклады РАСХН. 2006. №2. С. 60–63.
6. Bridgewater T. Towards the "bio-refinery" – Fast Pyrolysis of Biomass // Renewable Energy World, 2001, vol. 4, no. 1, pp. 66–83.
7. Чалых Е.Ф. Технология и оборудование электродных и электроугольных предприятий. М.: Metallurgy, 1972. С. 99–100.
8. Основы практической теории горения топлива / Под ред. В.В. Померанцева. Л.: Энергоатомиздат, 1986.
9. Сошкин С.В., Рутковский А.Л., Сошкин Г.Г. // Цветные металлы. 2008. №2. С. 108–110.
10. Мешков Е.И., Герасименко Т.Е., Ковалёва М.А. // Цветная металлургия. 2012. №4. С. 53–56.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

MATHEMATICAL SIMULATION OF THE PYROLYSIS PROCESS DURING CALCINATION OF CARBON-BASE MATERIALS

Gerasimenko Tatiana Evgenievna – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia. E-mail: gerasimenko_74@mail.ru.

Meshkov Evgeny Ivanovich – D.Sc. (Eng.), Professor, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia. E-mail: eimeshkov@gmail.com.

Chibashvili Alevtina Viktorovna – Postgraduate Student, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia. E-mail: dikarka88@mail.ru.

Abstract. This paper presents the mathematical model identification of the sublimation of volatiles from four basic types of carbon-base materials in quasi-static conditions of calcination. Appropriate coefficients and activation energies of volatile yield functions were determined. Possible forecasting of extraction of volatiles in industrial furnaces was shown.

Keywords: Carbon-base materials, calcination, quasi-static mode, volatiles, pyrolysis, mathematical model, activation energy, identification, accumulated and differential distribution functions.

References

1. *Khimiya i pererabotka uglya pod redaktsiej V.G. Lipovicha* [Chemistry and processing of coal. Ed. V.G. Lipovich]. Moscow: Chemistry, 1988, 336 p.
2. Gorislavets S.P., Tmenov D.N., Mayorov V.I. *Piroliz uglevodorodnogo syr'ya* [Pyrolysis of hydrocarbons]. The Ukrainian Academy of Sciences, the Institute of Gas. Kiev: Science. Dumka, 1977, 307 p.
3. Mukhina T. N., Barabanov N.L., Babashi S.E. et al. *Piroliz uglevodorodnogo syr'ya* [Pyrolysis of hydrocarbons]. Moscow: Chemistry, 1987, 238 p.
4. *Khimicheskaya tekhnologiya tvorydykh goryuchikh iskopaemykh: uchebnyk dlya vuzov pod redaktsiej G.N. Makarova i G.D. Kharlampovicha* [Chemical technology of solid fossil fuels: a textbook for universities. Ed. G.N. Makarov, G.D. Kharlampovich]. Moscow: Chemistry, 1986, 496 p.
5. Chirkov V.G., Weinstein E.F. Influence of speed to achieve the desired temperature on the chemical composition of the reaction products and energy characteristics of the pyrolysis of organic materials. *Doklady RASKHN* [Reports of RAAS]. 2006, no. 2, pp. 60-63.
6. Bridgewater T. Towards the "bio-refinery" – Fast Pyrolysis of Biomass. *Renewable Energy World*, 2001, vol. 4, no. 1, pp. 66-83.
7. Chalykh E.F. *Tekhnologiya i oborudovanie ehlektroodnykh i ehlektroougol'nykh predpriyatij* [Technology and equipment of electrode and electric carbon plants]. Moscow: Metallurgy, 1972, pp. 99-100.
8. *Osnovy prakticheskoy teorii gorenija topliva* [Fundamentals of a practical theory of fuel combustion]. Edited by Pomerantsev V.V. Leningrad: Energoatomizdat, 1986.
9. Soshkin S.V., Rutkovsky A.L., Soshkin G.G. *Tsvetnye metally* [Non-Ferrous Metals], 2008, no. 2, pp. 108-110.
10. Meshkov E.I., Gerasimenko T.E., Kovaleva M.A. *Tsvetnaya metallurgiya* [Non-Ferrous Metals]. 2012, no. 4, pp. 53-56.

Герасименко Т.Е., Мешков Е.И., Чибашвили А.В. Математическое моделирование процесса пиролиза при прокатке углеродных материалов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №3. С. 70–74.

Gerasimenko T.E., Meshkov E.I., Chibashvili A.V. Mathematical simulation of the pyrolysis process during calcination of carbon-base materials. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 3, pp. 70–74.

УДК 621.926.5:001.891.57

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДВИЖЕНИЯ МЕЛЮЩИХ ТЕЛ В БАРАБАННОЙ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЕ

Козырь А.В., Кутлубаев И.М., Попова Т.М., Пыталев И.А.

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

Аннотация. В работе предложено использование имитационной модели для определения параметров работы шаровой мельницы, прототипом которой послужила лабораторная установка. Представлены результаты для каскадного, водопадного и критического режима работы шаровой мельницы, полученные при физическом и имитационном моделировании. На основе выявленных результатов обосновано отклонение данных моделирования, что доказывает адекватность разработанной имитационной модели.

Ключевые слова: лабораторная установка, моделирование, имитационная модель, режимы работы шаровой мельницы, режимы движения, каскадный, водопадный.

Введение

Подготовка руд к обогащению предполагает измельчение материалов. С целью получения заданной крупности твердых материалов в горной промышленности наибольшее распространение получили барабанные мельницы, используемые как для грубого, так и тонкого помола [1]. Рабочими элементами этих мельниц являются мелющие тела в виде шаров и цилиндров [2]. Процесс измельчения является энерго- и материалоемким, так при обогащении полезных ископаемых энергетические затраты на данный процесс составляют 40–70% от общих расходов обогатительной фабрики [3–6]. В связи с этим снижение затрат в значительной степени на измельчение является важной и актуальной задачей. Величина эксплуатационных затрат зависит от режима работы мельницы, характеристик измельчаемого материала, формы мелющих тел, типа мельницы и др. [7].

Основная часть

Определение рациональных параметров процесса измельчения, как правило, проводится на основе экспериментов, выполняемых на лабораторных установках. Несмотря на то, что выполнение экспериментов осуществляется в лабораторных установках, их проведение требует существенных затрат. Снижение затрат на определение рациональных параметров может быть достигнуто за счет компьютерного моделирования процесса измельчения в шаровой мельнице. С этой целью была разработана имитационная модель работы шаровой мельницы с использованием программного обеспечения 3D-САПР Autodesk Inventor Professional [8]. Модель позволяет варьировать скоростными режимами, футеровкой барабана и формой мелющих тел.

В качестве прототипа имитационной модели использована лабораторная установка по определению режимов работы шаровой мельницы (рис. 1).



Рис. 1. Лабораторная установка

В качестве исходных параметров в имитационной модели использовались параметры, совпадающие с параметрами лабораторной установки:

1. Барабан мельницы – диаметр 0,18 м, длина барабана 0,22 м.
2. Мелющее тело – шар стальной мелющий диаметр 8 мм [9].
3. Скорость вращения – 0–300 об/мин.
4. Коэффициент заполнения – 24% (допустимая величина при работе мельниц [10]).
5. Коэффициент трения в рамках системы барабан - мелющее тело принят 0,8.

Фронтальный вид и изометрическая проекция имитационной модели представлены на рис. 2.

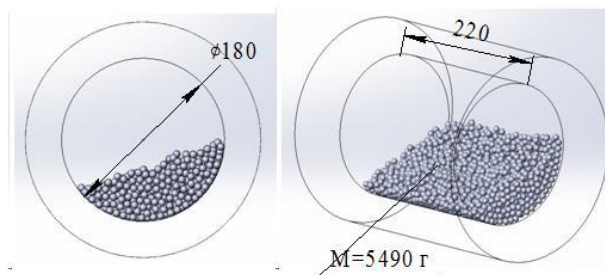


Рис. 2. Фронтальный вид и изометрическая проекция имитационной модели

Построение модели в среде 3D-САПР Autodesk Inventor Professional основано на воссоздании замкнутого цилиндрического пространства, которым в реальной модели является полость барабана, с последующим заполнением его мелющими телами. Пространственная ориентация барабана в модели обеспечивается ограничением степеней свободы по всем направлениям кроме оси вращения. Мелющими телами в лабораторной установке являются шары, поэтому в имитационной модели был создан массив элементов с геометрической формой шара диаметром 8 мм. Пространственное положение мелющих тел определяется контактом друг с другом и внутренней поверхностью барабана.

На первом этапе для проверки соблюдения условий соответствия работы функционирования модели и лабораторной установки в имитационной модели измельчаемая среда отсутствовала.

Моделирование работы шаровой мельницы производилось для частот вращения барабана в диапазоне от 54 до 204 об/мин с заданным временем работы на определенной скорости. Исследование проводилось на установившихся режимах работы, которые задаются частотой вращения барабана лабораторной установки.

Полученные результаты моделирования для каскадного, водопадного режима и критической скорости вращения барабана были сопоставлены с результатами, полученными на лабораторной установке (рис. 3).

Сравнительный анализ полученных результатов компьютерного моделирования и лабораторной установки показал, что разработанная имитационная модель имеет высокую степень сходимости: для каскадного режима при скорости вращения 54 об/мин угол отрыва мелющих тел на лабораторной установке составляет 34.87° в имитационной модели – 34.00° , для водопадного режима при скорости вращения 164,7 об/мин угол отрыва мелющих тел на лабораторной установке составляет 43.54° , в имитационной модели – 43.18° , при критической скорости вращения 204,6 об/мин угол отрыва мелющих тел на лабораторной установке составляет 44.20° , в имитационной модели – 43.91° . Отклонение результатов, полученных в результате физического моделирования, от результатов имитационного моделирования в среднем составляет 1%.

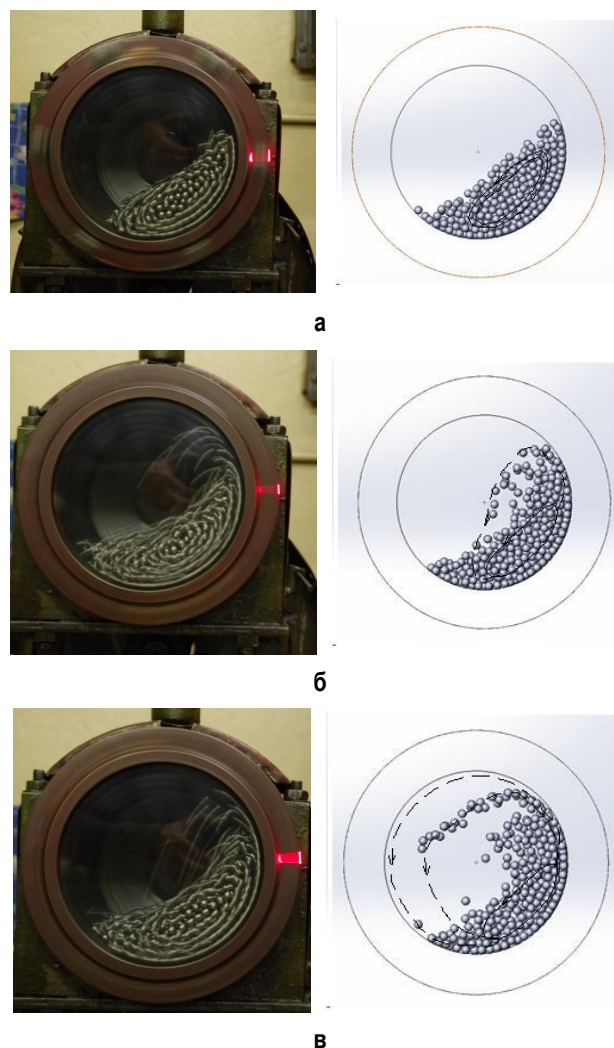


Рис. 3. Результаты, снятые с лабораторной установки, и результаты моделирования:
а – скорость вращения 53,3 об/мин, режим – каскадный; **б** – скорость вращения 164,7 об/мин, режим – водопадный; **в** – скорость вращения – критическая, 204,6 об/мин

Заключение

Проведенные эксперименты подтвердили адекватность имитационной модели, что позволяет использовать ее для исследования процесса измельчения в мельницах вместо физического моделирования. Имитационная модель является инструментом для анализа работы барабанной мельницы с применением мелющих тел различной формы. Так же с помощью созданной модели возможно определение рациональных параметров работы шаровой мельницы при различных режимах работы с мелющими телами различных форм.

Список литературы

1. Monov V., Sokolov B., Stoenchev St. Grinding in Ball Mills: Modeling and Process Control // *Cybernetics and information technologies*. 2012. V. 12. №2. P. 51–68.
2. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий/ под общ. ред Г.М. Островского. Ч. I. СПб.: АНО НПО «Профессионал», 2004. 848 с.
3. Цыгалов А.М., Елисеев Н.И., Гришин И.А. Дробление, измельчение и подготовка руд к обогащению: учеб. пособие. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2005. 170 с.
4. Новый подход для оценки эффективности работы горно-обогатительных комбинатов / Мельников И.Т., Гавришев С.Е., Михайлов А.Г., Пытаев И.А., Шевцов Н.С., Васильев К.П. // *Горная промышленность*. 2012. №5. С.60–66
5. Abanti Sahoo, Simulation studies on Energy Requirement, Work Input and Grindability of Ball Mill/ *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2014. V. 4. №2 P. 592–597.
6. Шадрюнова И.В., Кутлубаев И.М., Колодежная Е.В. Анализ силового взаимодействия при разрушении породы в дробилках ударного действия // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2008. №2. С. 9–12.
7. Дмитрак Ю.В., Балахнина Е.Е. Особенности движения мелющей загрузки в шаровой барабанной мельнице // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2003. №2. С. 54–57.
8. Строгалев В.П., Толкачева И.О. Имитационное моделирование: учеб. пособие. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 280 с.
9. ГОСТ 7524-89. Шары стальные мелющие для шаровых мельниц. Введ. 1990-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1990. 4 с.
10. Дуда В. Цемент / пер. с нем. Е.Ш. Фельдмана; под ред. Б.Э. Юдовича. М.: Стройиздат, 1981. 464 с.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

SIMULATION MODELING OF THE PROCESS OF MOVING OF GRINDING BODIES IN A BALL MILL

Kozyr Aleksandr Valerievich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7 (3519) 29-85-74. E-mail: kozyr_a@inbox.ru.

Kutlubaev Ildar Mukhametovich – D.Sc. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7 (3519) 29-85-74. E-mail: ptmr74@mail.ru.

Popova Tamara Maksimovna – M. S. Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7 (3519) 29-85-74. E-mail: t.m-popova@yandex.ru.

Pytaev Ivan Alekseevich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7 (3519) 29-85-56. E-mail: Vehicle@list.ru.

Abstract. This article proposes using a simulating model to determine the operating parameters of the ball mill. A prototype model was a laboratory-scale plant. The authors presented results for cascade, waterfall operating modes, and the critical speed of the ball mill which were effects of physical simulation and simulation modeling. The findings justified a deviation of the modeling data, which proved that the developed simulating model was appropriate.

Keywords: Laboratory-scale plant, modeling, simulating model, ball mill operating modes, modes of motion, cascade, waterfall.

References

1. Monov V., Sokolov B., Stoenchev St., Grinding in Ball Mills: Modeling and Process Control. *Cybernetics and information technologies*. 2012, vol. 12 no. 2, pp. 51-68.
2. *Novy spravochnik khimika i tekhnologa. Protsessy i apparaty khimicheskikh tekhnologii. Pod. obsch. red G.M. Ostrovskogo. Ch.I.* [New reference book of chemists and technologists. Processes and devices of chemical engineering. Under the general editorship of G.M. Ostrovsky. P.I.]. Saint Petersburg: ANO NPO Professional, 2004, 848 p.
3. Tsygalov A.M., Eliseev N.I., Grishin I.A. *Droblenie, izmelchenie i podgotovka rud k obogashcheniyu. Uchebnoe posobie* [Ore crushing, grinding, and preparation for dressing]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2005, 170 p.
4. Melnikov I.T., Gavrishchev S.E., Mikhailov A.G., Pytaev I.A., Shevtsov N.S., Vasilev K.P. A new approach to performance assessment of mining and processing works. *Gornaya promyshlennost* [Mining]. 2012, no. 5, pp. 60-66.
5. Abanti Sahoo, Simulation studies on Energy Requirement, Work Input and Grindability of Ball Mill. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2014, vol. 4, no. 2, pp. 592-597.
6. Shadrinova I.V., Kutlubaev I.M., Kolodezhnaya E.V. Evaluation of force impact when crushing rock in impact grinders. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im.G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2008, no. 2, pp. 9-12.
7. Dmitrak Yu.V., Balakhnina E.E. Peculiarities of movements of grinding charge in ball mills. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)], 2003, no. 2, pp. 54-57.
8. Strogalev V.P., Tolkacheva I.O. *Imitatsionnoe modelirovanie. Uchebnoe posobie* [Simulation modelling. Learning aid]. Moscow: Bauman MSTU, 2008, 280 p.
9. GOST 7524-89. Shary stalnye melyushchie dlya sharovykh melnits [Steel grinding balls for ball mills]. Moscow: Publishing house of standards, 1990, 4 p.
10. Duda V. *Tsement* [Cement]. Translated from German by E.Sh. Feldman; edited by B.E. Yudovich. Moscow: Stroyizdat, 1981, 464 p.

Имитационное моделирование процесса движения мелющих тел в барабанной шаровой мельнице / Козырь А.В., Кутлубаев И.М., Попова Т.М., Пытаев И.А. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2015. №3. С. 75–77.

Kozyr A.V., Kutlubaev I.M., Popova T.M., Pytaev I.A. Simulation modeling of the process of moving of grinding bodies in a ball mill. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 3, pp. 75–77.

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

УДК 669-156:620-17

СВОЙСТВА ВЫСОКОХРОМИСТЫХ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ, ПОДВЕРГНУТЫХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Смирнов М.А.¹, Пышминцев И.Ю.¹, Лаев К.А.¹, Храмков Е.В.², Алютин Д.М.²¹ Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности, Челябинск, Россия² Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия

Аннотация. Исследовано влияние высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО) на механические свойства высокохромистых сталей 20Х13 и 02Х13Н4М. При ВТМО деформация осуществлялась прокаткой с обжатием 30% при 1000–900°C с последующим охлаждением в масле. Установлено, что ВТМО обеспечивает при высоком отпуске небольшое повышение пределов текучести и прочности обеих сталей при некотором снижении их пластичности. Эффект термомеханического упрочнения возрастал с понижением температуры прокатки. Влияние ВТМО на ударную вязкость исследованных сталей различно. ВТМО не оказало положительного влияния на ударную вязкость стали 02Х13Н4М, претерпевающей в высокоотпущенном состоянии вязкое транскристаллитное разрушение. Рост ударной вязкости при ВТМО наблюдали на стали 20Х13, что связано с подавлением развития интеркристаллитных трещин при динамическом нагружении. Показано, что, заменяя интеркристаллитное разрушение транскристаллитным, ВТМО эффективно затрудняет развитие обратимой отпускной хрупкости.

Ключевые слова: высокотемпературная термомеханическая обработка, высокохромистые стали, ударная вязкость, прочностные свойства, пластичность, обратимая отпускная хрупкость.

Введение

В трубной промышленности для изготовления обсадных бесшовных труб, используемых для обустройства скважин в северных районах, применяют коррозионностойкие стали с 12–14% хрома. Трубы из этих сталей подвергают закалке и высокому отпуску. После такой обработки они должны обладать не только высоким уровнем прочности, но и высокой ударной вязкостью.

Известно, что комплекс механических свойств многих конструкционных сталей можно улучшить, используя высокотемпературную термомеханическую обработку (ВТМО) [1]. Представлялось целесообразным выяснить, как влияет такая обработка на механические свойства высокохромистых сталей. В настоящей работе после ВТМО сопоставлены свойства сталей 20Х13 и 02Х13Н4М, существенно различающихся уровнем пластичности и ударной вязкости в высокоотпущенном состоянии.

Материал и методика исследования

Химический состав исследованных сталей приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав исследованных сталей, %

Марка стали	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo
20Х13	0,20	0,55	0,68	0,004	0,016	13,26	0,10	0,02
02Х13Н4М	0,018	0,57	0,30	0,008	0,006	12,44	4,07	1,42

Сталь 20Х13 была промышленной выплавки. Из горячекатаных труб вдоль направления прокатки вырезались заготовки сечением 13×18 мм. Сталь 02Х13Н4М выплавляли в вакууме в лабораторных условиях. Слиток из этой стали прокатывали в прутки, из которых изготавливали заготовки, аналогичные заготовкам из стали 20Х13. ВТМО осуществляли по следующим режимам. Заготовки подвергали аустенизации при температуре 1000°C с 30-минутной выдержкой. Затем следовала деформация прокаткой со скоростью 1 с⁻¹ и обжатием 30% за один проход с последующим немедленным охлаждением в масле. Часть заготовок прокатывали непосредственно после аустенизации. Другие заготовки деформировали после подстуживания от 1000 до 950 и 900°C и двухминутной выдержки при этих температурах. Кроме того, партия

заготовок была закалена в масле от 1000°C без деформации. Окончательной операцией являлся односторонний отпуск при 650–700°C.

Структуру изучали с использованием оптической и электронной сканирующей микроскопии. Рентгеновскую съемку в железном излучении проводили на аппарате ДРОН-0,7, снабженном аппаратно-программным комплексом для автоматического управления дифрактометром и регистрации результатов. Испытания на статическое растяжение проводили на пятикратных образцах с диаметром рабочей части 6 мм. Для оценки ударной вязкости использовали образцы с V-надрезом.

Материал и методика исследования

При нагреве на 1000°C в стали 20X13 сформировалось аустенитное зерно 7–8 балла, а в стали 02X13N4M – 5–6 балла. При выбранных режимах деформации развития рекристаллизации не обнаружено. Для деформированных заготовок характерно вытянутое аустенитное зерно в направлении осуществления прокатки. На границах зерен наблюдалось слабо выраженная зубчатость, характерная для ВТМО.

Образцы стали 20X13, деформированные при 950 и 900°C, то есть ниже температуры исходного нагрева, имели меньшие значения параметра решетки мартенсита, чем образцы, закаленные непосредственно от 1000°C без деформации (табл. 2). Такой эффект следует связывать с обеднением аустенита углеродом и выделением карбидной фазы при осуществлении ВТМО. Судя по изменению параметра решетки, при снижении температуры прокатки от 950 до 900°C распад твердого раствора усиливается. Об этом же свидетельствует и характер изменения физического уширения интерференционных линий (110) и (211). На величину их уширения оказывает влияние как плотность дислокаций, так и содержание углерода в твердом растворе. Как известно, дислокационная структура, создаваемая в аустените горячей деформацией, наследуется при мартенситном превращении [1]. Чем ниже температура прокатки, тем выше должна быть плотность дислокаций в аустените, а следовательно, и в мартенсите, и соответственно больше уширение его интерференционных линий. Меньшие значения уширения интерференционных линий после прокатки при 900°C по сравнению с деформацией при 950°C можно связать с более интенсивным распадом твердого раствора при ВТМО. Отметим, что процессы карбидообразования при ВТМО могут получать развитие не только непо-

средственно во время деформирования, но и при подстуживании до температуры прокатки и при последеформационных паузах.

Таблица 2
Результаты рентгеноструктурного анализа стали 20X13

Режим обработки	Параметр решетки, Å	Физическое уширение линий	
		(110)	(211)
		рад·10 ⁻³	
Закалка от 1000°C	2,8691	6,1	13,2
ВТМО с деформацией при 950°C	2,8688	10,0	24,4
ВТМО с деформацией при 900°C	2,8678	9,5	23,4

Механические свойства стали 20X13 оценивали после отпуска при 700°C, который часто используют при термической обработке обсадных труб. Такой отпуск сопровождается образованием карбидов Me₂₃C₆, для выделения которых характерна локализация на границах аустенитного зерна и границах реек α-фазы, сохранившихся при отпуске.

В высокоотпущенном состоянии образцы, подвергнутые ВТМО, имеют более высокие пределы текучести и прочности, чем после обычной термической обработки. Но эффект дополнительного термомеханического упрочнения весьма невелик (табл. 3). Он несколько возрастает при снижении температуры прокатки от 1000 до 950°C. С дальнейшим понижением температуры деформации до 900°C уровень прочности несколько снижается. По-видимому, во время горячей пластической деформации при 900°C и, возможно, при подстуживании до этой температуры от 1000°C из аустенита выделяются карбиды неоптимальной степени дисперсности. В результате этого объемная доля карбидов, образующихся при отпуске, уменьшается, что приводит к снижению эффекта дисперсионного твердения.

Таблица 3
Механические свойства стали 20X13
после отпуска при 700°C

Режим обработки	σ _{0,2}	σ _в	δ	ψ	KCV
	МПа	МПа	%	%	+20°C, Дж/см ²
Закалка от 1000°C	583	798	23,7	64	87
ВТМО с деформацией при 1000°C	630	846	19,0	58	98
ВТМО с деформацией при 950°C	683	865	19,7	58	110
ВТМО с деформацией при 900°C	660	856	20,6	61	131

Сталь 02X13H4M подвергали отпуску при 650°C, то есть при более низкой температуре, чем сталь 20X13, так как легирование никелем сопровождалось значительным снижением точки $A_{с3}$. Как и в случае стали 20X13, термомеханическая обработка обеспечила лишь относительно небольшое дополнительное упрочнение этой стали. Но ввиду того, что при осуществлении ВТМО карбидообразование в аустенитной области не получило существенного развития, для нее наблюдалась другая зависимость прочности от температуры деформации: дополнительный эффект термомеханического упрочнения возрастал при снижении температуры прокатки от 1000 до 900°C (табл. 4).

Таблица 4

**Механические свойства стали 02X13H4M
после отпуска при 650°C**

Режим обработки	$\sigma_{0,2}$	σ_B	δ	ψ	KCV, Дж/см ²	
	МПа		%		+20°C	-60°C
Закалка от 1000°C	775	863	17	75	194	148
ВТМО с деформацией при 1000°C	828	902	15	71	186	142
ВТМО с деформацией при 950°C	830	907	17	74	180	138
ВТМО с деформацией при 900°C	858	929	15	76	162	145

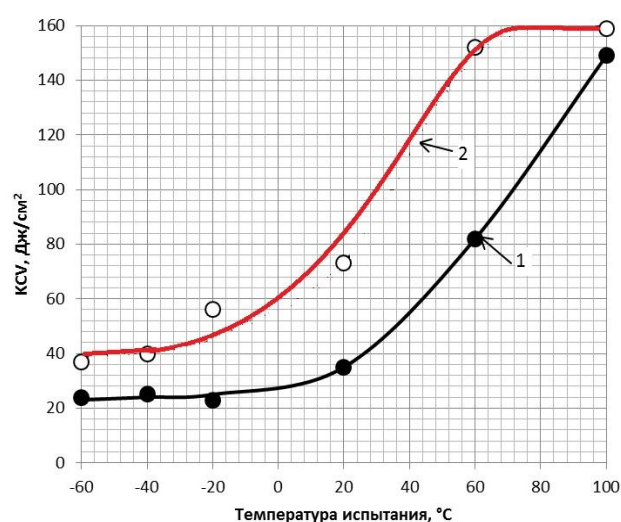
Что касается пластичности, то для обеих сталей характерна общая закономерность: увеличение прочности при ВТМО сопровождается небольшим ее снижением.

ВТМО оказало благоприятное влияние на ударную вязкость высокоотпущенной стали 20X13 при комнатной температуре испытания. При этом уровень ударной вязкости термомеханически упрочненных образцов с понижением температуры прокатки возрастает.

Фрактографическое исследование изломов показало, что разрушение стали 20X13 при динамическом нагружении протекало как по телу, так и по границам аустенитного зерна. Транскристаллитное разрушение осуществлялось как вязко, так и квазисколом. При этом на участках излома, соответствующих транскристаллитному разрушению, преобладали фасетки квазискола. На участках интеркристаллитного разрушения, занимающих около 30–40% поверхности излома, наблюдались хрупкие

зернограницные фасетки. По-видимому, развитию интеркристаллитных трещин способствовало выделение зернограницных карбидов. После ВТМО разрушение стали 20X13 протекало преимущественно по телу зерна. Именно подавление хрупкого интеркристаллитного разрушения и следует считать основной причиной повышения ударной вязкости при ВТМО.

Сталь 20X13 склонна к развитию обратимой отпускной хрупкости. Представлял интерес проследить, как ВТМО влияет на этот вид интеркристаллитного охрупчивания. В связи с этим образцы стали 20X13 после отпуска 700°C подвергали дополнительному десятичасовому нагреву при 520°C. Такой провоцирующий нагрев сопровождался существенным охрупчиванием стали. Судя по положению серийных кривых ударной вязкости, ее температурный интервал вязкохрупкого перехода лежит в области положительных температур (рис. 1).



**Рис. 1. Серийные кривые ударной вязкости
стали 20X13 после отпуска
700°C, 1 ч + 520°C, 10 ч: 1 – без деформации;
2 – ВТМО с деформацией при 900°C**

Недеформированные образцы лишь при +100°C претерпевают преимущественно вязкое транскристаллитное разрушение; изломы имели ямочное дуплексное строение. Но даже в этом случае в средней части изломов встречаются в небольшом количестве хрупкие зернограницные фасетки. При снижении температуры испытания до комнатной температуры изломы недеформированных образцов становятся практически полностью хрупкими интеркристаллитными (рис. 2, а).

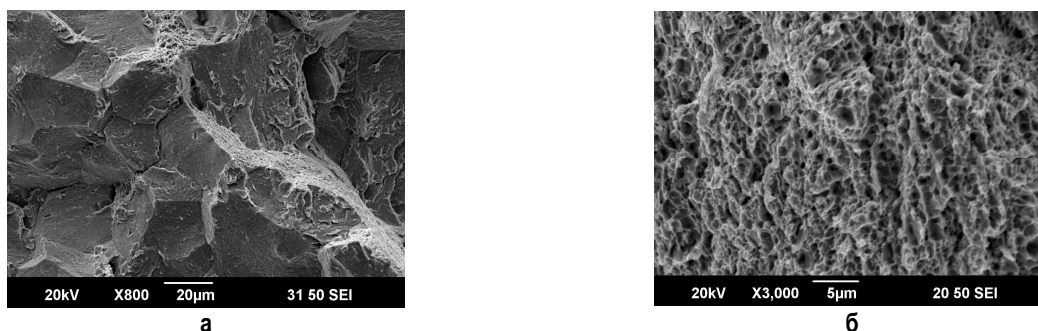


Рис. 2. Характерный вид изломов стали 20X13 после отпуска 700°C, 1 ч + 520°C, 10 ч при температуре испытаний +20°C: а – без деформации; б – ВТМО с деформацией при 900°C

ВТМО с деформацией при 900°C приводит к смещению серийной кривой ударной вязкости в сторону более низких температур. При всех исследованных температурах испытания эта обработка подавила интеркристаллитное разрушение, заменив его транскристаллитным. Судя по ямочному строению изломов, транскристаллитное разрушение деформированных образцов при +100...–20°C протекает вязко (рис. 2, б). Наблюдаемому уменьшению ударной вязкости при снижении температуры испытания в этом интервале соответствует уменьшение размеров и глубины ямок в изломах. При более низких температурах испытания (–40 и –60°C) на поверхности разрушения наряду с участками вязкого разрушения появляются фасетки скола.

Иной характер влияния ВТМО оказала на ударную вязкость стали 02X13H4M. Эта сталь по сравнению со сталью 20X13 имеет в высокоотпущенном состоянии больший уровень KCV. Ему соответствует вязкий транскристаллитный характер разрушения вплоть до –60°C. Такой же тип разрушения наблюдался и у термомеханически упрочненных образцов. При отсутствии принципиального изменения характера разрушения положительное влияние ВТМО на ударную вязкость отсутствовало. После этой обработки уровень KCV тоже несколько понизился по сравнению с недеформированным состоянием.

Таким образом, при ВТМО высокохромистых сталей, закаливаемых на мартенсит и подвергаемых высокому отпуску, реализуются закономерности, которые ранее были выявлены на сложнолегированных высокоотпущенных сталях [2, 3]:

- Проведение ВТМО может осложняться преждевременным обеднением аустенита углеродом и образованием карбидов при подстуживании от температур аустенизации до температур прокатки и последующем деформировании. Выделение карбидов неоптимальной степени дис-

персности отрицательно влияет на эффект термомеханического упрочнения.

- Если при высоком отпуске отсутствует развитие процессов охрупчивания, то ВТМО, увеличивая прочностные свойства, несколько снижает ударную вязкость.

- ВТМО ослабляет развитие интеркристаллитного охрупчивания, обусловленного выделением межзеренных карбидов или образованием зернограничных сегрегаций вредных примесей (обратимая отпускная хрупкость).

Одной из основных причин торможения развития интеркристаллитных трещин после ВТМО является зубчатое строение границ зерен [4]. Микротрещина, возникшая в пределах одного элемента зубчатости, оказывается отделенной от соседней микротрещины и их слияние в общую трещину сопровождается пластической деформацией приграничных районов. ВТМО также влияет на сегрегацию примесей на границах аустенитных зерен. Есть основания считать, что процессы, происходящие при горячей деформации, способствуют очищению границ зерен от примесей. Не вызывает сомнений, что это общие закономерности воздействия ВТМО на состояние границ зерен реализуются и на высокохромистых сталях.

Известно, что при ВТМО некоторых сталей и сплавов может существенно изменяться характер выделения межзеренных карбидов, в частности их морфология, что также влияет на склонность к развитию межзеренных трещин [2]. Но такого эффекта при исследовании стали 20X13 не обнаружено: в недеформированных и деформированных образцах на границах зерен наблюдали глобулярные частицы близкой степени дисперсности.

Выводы

1. ВТМО обеспечивает сравнительно небольшое повышение прочностных свойств высокоотпущенных сталей 20X13 и 02X13H4M при некотором снижении их пластичности.

2. Влияние ВТМО на ударную вязкость зависит от особенностей разрушения высокоотпущенных сталей при динамическом нагружении. Если сталь претерпевает хотя бы частичное инттеркристаллитное разрушение, то ВТМО, затрудняя его развитие, повышает ударную вязкость (20Х13). Когда разрушение происходит полностью транскристаллитным путем, благоприятное влияние ВТМО на ударную вязкость не реализуется (02Х13Н4М).

3. ВТМО ослабляет развитие обратной отпусковой хрупкости в стали 20Х13, заменяя инттеркристаллитное разрушение транскристаллитным.

Список литературы

1. Бернштейн М.Л., Займовский В.А., Капуткина Л.М. Термомеханическая обработка стали. М.: Металлургия, 1983. 480 с.
2. Смирнов М.А., Петрова С.Н., Смирнов Л.В. Высокотемпературная термомеханическая обработка и хрупкость сталей и сплавов. М.: Наука, 1991. 167 с.
3. Смирнов М.А., Филатов В.И. Высокотемпературная термомеханическая обработка легированных конструкционных и инструментальных сталей // Металловедение и термическая обработка металлов. 2014. №9. С. 15–21.
4. Соколов Е.Н., Петрова С.Н. Влияние пластической деформации в аустенитном состоянии на характер разрушения стали 35ХГСА в состоянии отпускной хрупкости // Физика металлов и металловедение. 1959. Т. 7. Вып. 2. С. 306–308.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

PROPERTIES OF HIGH-CHROMIUM CORROSION-RESISTANT STEELS EXPOSED TO HIGH-TEMPERATURE THERMOMECHANICAL TREATMENT

Smirnov Mikhail Anatolievich – D.Sc. (Eng.), Researcher of the Russian Research Institute of the Tube&Pipe Industries Open Joint Stock Company, Chelyabinsk, Russia.

Pyshmintsev Igor Yurievich – D.Sc. (Eng.), General Director, the Russian Research Institute of the Tube&Pipe Industries Open Joint Stock Company, Chelyabinsk, Russia.

Laev Konstantin Anatolievich – Engineer, the Russian Research Institute of the Tube&Pipe Industries Open Joint Stock Company, Chelyabinsk, Russia.

Khramkov Evgeny Vladimirovich – Postgraduate Student, National Research South Ural State University, Chelyabinsk, Russia. Tel.: +7-951-476-17-07. E-mail: hramkov@rosniti.ru

Alyutin Dmitriy Mikhailovich – Postgraduate Student, National Research South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.

Abstract. The influence of high-temperature thermomechanical treatment (HTTT) on mechanical properties of high-chromium steels 20Cr13 and 02Cr13Ni4Mo was studied. In case of HTTT deformation was performed by rolling with a reduction of 30% at 1000-900°C, followed by cooling in oil. It was found that HTTT with high tempering provided a slight increase in yield strength and strength of both steels with some decrease in their ductility. The effect of thermomechanical hardening increased when the rolling temperature decreased. Influence of HTTT on toughness of the steels was different. HTTT didn't have a positive effect on toughness of steel 02Cr13Ni4Mo. High-tempered 02Cr13Ni4Mo had viscous transcrystalline fracture. The growth of toughness of steel 20Cr13 was observed, which was associated with the suppression of intercrystalline cracks under dynamic loading. It was shown that by replacing intercrystalline fracture with transcrystalline fracture, HTTT effectively hindered development of reversible temper brittleness.

Keywords: High-temperature thermomechanical treat-

ment, high-chromium steels, toughness, mechanical properties, ductility, reversible temper brittleness.

References

1. Bernstein M.L., Zaymovsky V.A., Kaputkina L.M. *Termomekhanicheskaya obrabotka stali* [Thermomechanical processing of steel]. Moscow: Metallurgy, 1983, 480 p.
2. Smirnov M.A., Petrova S.N., Smirnov L.V. *Vysokotemperaturnaya termomekhanicheskaya obrabotka i khrupkost' staley i spлавov* [High-temperature thermomechanical treatment and brittleness of steels and alloys]. Moscow: Nauka, 1991, 167 p.
3. Smirnov M.A., Filatov V.I. High-temperature thermomechanical treatment of alloy structural and tool steels. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metallurgy and heat treatment of metals]. 2014, no. 9, pp. 15-21.
4. Sokolov E.N., Petrova S.N. Influence of plastic deformation in the austenitic state on the nature of the destruction of steel 35KhGSA in a state of temper brittleness. *Fizika metallov i metallovedenie* [Physics of metals and metallurgy]. 1959, vol. 7, issue 2, pp. 306-308.

Свойства высокохромистых коррозионностойких сталей, подвергнутых высокотемпературной термомеханической обработке / Смирнов М.А., Пышминцев И.Ю., Лаев К.А., Храмов Е.В., Алютин Д.М. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №3. С. 78–82.

Smirnov M.A., Pyshmintsev I.Yu., Laev K.A., Khramkov E.V., Alyutin D.M. Properties of high-chromium corrosion-resistant steels exposed to high-temperature thermomechanical treatment. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 3, pp. 78–82.

НАДЕЖНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 621.771.07

ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПОДШИПНИКОВЫХ ОПОР ПРОКАТНЫХ КЛЕТЕЙ «КВАРТО» ПРИ ИХ ТЕХНИЧЕСКОМ ОБСЛУЖИВАНИИ

Пузик Е.А.¹, Жиркин Ю.В.¹, Филатов А.А.²¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия² ГНЦ «ВНИИМЕТМАШ», Москва, Россия

Аннотация. В данной статье рассмотрены вопросы технического обслуживания прокатных клетей «кварто», приведены данные о техническом обслуживании производственных объектов данной сферы ОАО «ММК», описана методика по установлению влияния различных смазочных материалов на ресурс подшипников качения, приведены результаты расчётов, позволяющие осуществить выбор оптимального класса вязкости смазочного материала, в определённых производственных условиях увеличивающего долговечность работы подшипниковых узлов исследуемых объектов.

Ключевые слова: подшипниковые опоры прокатных клетей, долговечность подшипников качения, техническое обслуживание подшипниковых опор.

Введение

Долговечность подшипников качения является комплексной характеристикой влияния различных факторов, среди которых особое место занимают условия их эксплуатации. Подшипники качения (ПК) прокатных клетей подвержены значительным нагрузкам при высоких скоростях качения, в результате чего развиваются высокие температуры, что способствует их перегреву и последующему отказу. Так, на сегодняшний день средний ресурс подшипников качения наиболее нагруженной 5 рабочей клетки стана-тандем 2000 холодной прокатки по данной причине составляет 4711 ч, что ведёт к существенным затратам на поддержание оборудования в работоспособном состоянии. Решение проблем повышения ресурса подшипниковых опор прокатных клетей «кварто» отражено в ряде работ [1–4] и связано с изменением конструктивного исполнения каналов подвода смазочного материала и режима его подачи в подшипники качения.

Материалы и методы исследования

В данной статье решается задача повышения ресурса подшипниковых опор в процессе их технического обслуживания путём применения минерального масла класса вязкости, обеспечивающего

минимальное тепловыделение в нагруженной зоне контакта подшипников качения опор валков рабочих клетей «кварто». Согласно ГОСТ 18322-78 «Система технического обслуживания и ремонта. Термины и определения» техническое обслуживание (ТО) – это комплекс операций по поддержанию работоспособности или исправности изделия при использовании по назначению, ожидании, хранении и транспортировании.

ТО подшипниковых опор предполагает решение следующих вопросов:

- 1) выбор определённой системы смазывания ПК опор валков;
- 2) выбор режима подачи смазочного материала (СМ);
- 3) выбор марки СМ.

Вопросы применения различных систем смазывания и выбора режима смазывания, как правило, представлены в рекомендациях изготовителей подшипников качения, таких как FAG, SKF, NSK, TIMKEN, SNC, Koyo, Kluber lubrication.

На стане-тандем 2000 холодной прокатки ОАО «ММК» техническое обслуживание подшипниковых опор валков прокатных клетей осуществляется автоматизированной системой смазывания «масло-воздух», особенностью которой является дозированная подача минерального масла в узел трения. Точечная доставка

смазочного материала в дозируемых количествах при высоких физических и температурных нагрузках является основой для их широкого использования при техническом обслуживании подшипниковых опор. Кроме того, изготовители подшипников – FAG, SKF, NSK, TIMKEN, SNC, Kooyo и другие рекомендуют использование именно этой системы смазывания.

Вопрос выбора определённой марки СМ в конкретных условиях эксплуатации остаётся открытым, хотя и существуют рекомендации, выданные фирмами-изготовителями подшипников качения. Однако в данных рекомендациях, как правило, указывается диапазон классов вязкости (КВ) с последующим установлением конкретно КВ в процессе эксплуатации.

Так, например, в настоящее время для смазывания подшипниковых опор рабочих и опорных валков 1–5 клетей стана 2000 холодной прокатки (ХП) применяется минеральное масло Mobilgear 320 класса вязкости 320.

Но оно, как показала практика, не является оптимальным. Выбор соответствующего КВ СМ определяется возможностью реализации в подшипниках качения опор валков прокатных клетей режима эластогидродинамической (ЭГД) смазки, что рассматривалось в работах [5, 6]. Проявление же термоэффекта входной зоны на контакте ведёт к интенсивному тепловыделению, которое зависит от вязкости смазочного материала, поступающего в зону контакта.

Поэтому важно знать значения температуры смазочного слоя в нагруженной зоне подшипника качения, которая и определяет фактическую вязкость смазочного материала на контакте и соответственно условия реализации режима эластогидродинамической смазки.

С этой целью было проведено исследование характеристик смазочного материала различных классов вязкости в нагруженной зоне подшипника качения.

Исследование проводилось на испытательном стенде кафедры проектирования и эксплуатации металлургических машин и оборудования ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова».

Данный стенд позволяет моделировать условия работы подшипников качения, установленных на производственных объектах, путём создания идентичных нагрузок и скоростей качения в контакте. Основным критерием подобия на данном стенде является толщина масляной плёнки, разделяющей трущиеся поверхности, величина которой одинакова для подшипников качения, установленных на испытательном стенде, и подшипников качения, установленных на

производственных объектах [7].

На данном стенде моделировались условия на контакте, в подшипниках качения рабочих валков прокатных клетей «кварто» и, в частности, в прокатных клетях №1, 2, 3 стана-тандем 2000 ХП ОАО «ММК».

Согласно [8] момент трения в подшипнике качения находится по формуле

$$M = M_1 + M_2, \quad (1)$$

где M_1 – момент трения, зависящий от типа подшипника и смазочного материала; M_2 – зависит от нагрузки на подшипник.

Момент M_1 (Н*мм), достигающий значительной величины при высокой частоте вращения и относительно небольших нагрузках, возникает в основном от гидродинамических потерь в смазке:

$$\text{при } vn \geq 2000 \quad M_1 = 10^{-7} \cdot f_0(vn)^{2/3} \cdot D_0^3. \quad (2)$$

Для исследования были выбраны минеральные масла следующих марок: ИР 100 КВ 100, ТНК 522 КВ 220, Mobilgear 320 КВ 320, 460ПВ КВ 460. Данные марки смазочного материала наиболее широко применяются для смазывания ПК в условиях производства.

Исследования проводились на двух различных скоростных режимах при числе оборотов приводного вала ЭУ 514 и 1400 об/мин, что обеспечивало формирование суммарных скоростей качения в подшипнике качения ЭУ 2,9 и 7,2 м/с, которые соответствуют суммарной скорости качения в подшипниках качения опор рабочих валков исследуемых объектов.

Подача смазочного материала осуществлялась порционно в объёме 10–20 мл каждые 2–3 мин.

Эксперимент проводился сериями. Каждая серия состояла из трёх экспериментов с использованием одного и того же смазочного материала и сохранением суммарной скорости качения в подшипнике.

В ходе проведения эксперимента с течением времени происходил постепенный разогрев подшипникового узла, что вело к изменению его теплового состояния и, соответственно, отражалось на величине момента сопротивления смазочного материала, как следствие, изменения вязкости на контакте трущихся поверхностей с изменением температуры.

Экспериментальные значения были аппроксимированы кривыми с величиной достоверности аппроксимации, варьируемой от 85,8 до 98,7%, которые представлены на рис. 1.

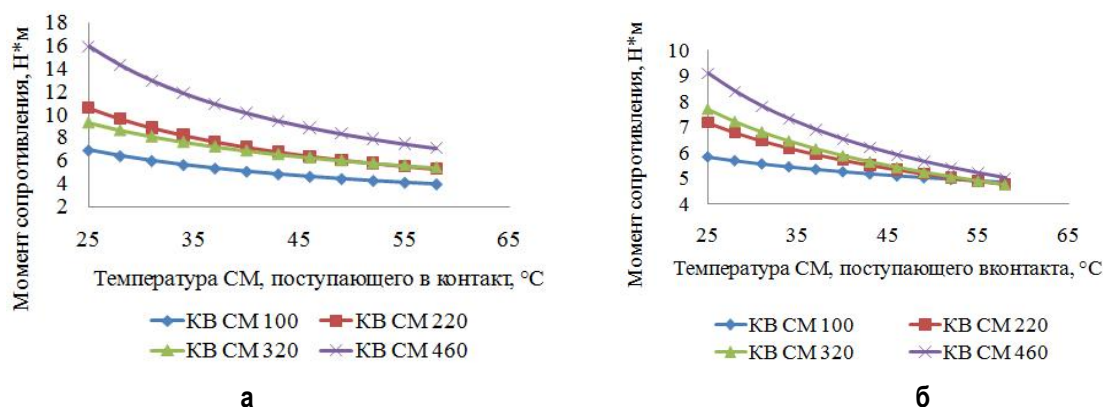


Рис. 1. Зависимость момента сопротивления смазочного материала в нагруженной зоне подшипника качения от температуры, с которой он подаётся в зону контакта

Полученные значения момента сопротивления СМ в ПК позволяют определить фактическую вязкости СМ и соответствующую ей температуру из зависимости

$$\nu_{\phi} = M^{3/2} \cdot K,$$

$$\text{где } K = (n^{2/3} \cdot f_0 \cdot 10^{-7} \cdot D_0^3)^{-3/2}. \quad (3)$$

Значение фактической кинематической вязкости с учётом давления на контакте по зависимости Баруса (3):

$$\nu_{\phi} = \nu_t e^{\alpha p}, \quad (4)$$

где ν_{ϕ} – вязкость смазочного материала на контакте трущихся поверхностей в подшипнике качения в условиях его нагружения, мм²/с, при давлении p , МПа; D_0 – средний диаметр подшипника, мм; f_0 – коэффициент, зависящий от типа подшипника и условий смазки; n – частота вращения подшипника, мин⁻¹, α – пьезокоэффициент вязкости СМ, 1/МПа.

Для определения пьезокоэффициента вязкости существует эмпирическая формула Вустера, устанавливающая зависимость пьезокоэффициента от вязкости смазочного материала при соответствующей температуре:

$$\alpha = (0.6 + \lg \nu_t) \cdot 10^{-2}. \quad (5)$$

Производя соответствующие преобразования зависимостей (3)–(5):

$$\nu_{t\phi} = e^N; \quad (6)$$

$$N = \frac{1.5 \cdot \ln M + \ln K - 0.0006p}{\left(\frac{0.01 \cdot p}{\ln 10} + 1\right)}.$$

Для определения фактической температуры на контакте в ПК воспользуемся формулой Прокофьева

$$\nu_{t\phi} = \nu_{t_3} \cdot \left(\frac{t_3}{t_{\phi}}\right)^n, \quad (7)$$

где $\nu_{t\phi}$ – кинематическая вязкость СМ при фактической температуре, мм²/с; ν_{t_3} – кинематическая вязкость СМ при эталонной температуре, мм²/с; t_3 – эталонная температура, °C; t_{ϕ} – фактическая температура, °C.

« n » – показатель степени из работы [9]

$$n = \frac{1 + \lg \nu_{t_3}}{2.8 - \lg t_3}.$$

При этом значение фактической температуры на контакте может быть вычислено по формуле

$$t_{\phi} = t_3 \cdot \left(\frac{\nu_{t_3}}{\nu_{t\phi}}\right)^{1/n}. \quad (8)$$

Тогда значение фактической температуры на контакте может быть определено по уравнению

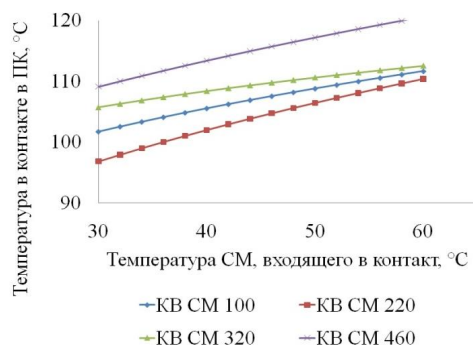
$$t_{\phi} = t_3 \cdot \left(\frac{\nu_{t_3}}{e^N}\right)^{1/n}, \quad (9)$$

$$\text{где } N = \frac{1.5 \cdot \ln M + \ln K - 0.0006p}{\left(\frac{0.01 \cdot p}{\ln 10} + 1\right)};$$

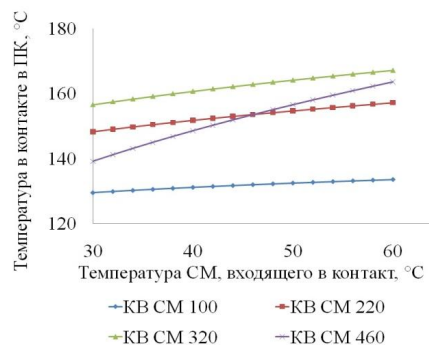
$$K = (n^{2/3} \cdot f_0 \cdot 10^{-7} \cdot D_0^3)^{-3/2}.$$

Полученные экспериментально-расчётным путём значения температур на контакте представлены на **рис. 2**.

В настоящее время в справочной литературе отсутствуют значения пьезокоэффициентов для выбранных марок СМ: ИР 100 КВ 100, ТНК 522 КВ 220, Mobilgear 600ХР 320 КВ 320, 460ПВ КВ 460. Поэтому для выполнения дальнейшего ЭГД-расчёта ставится задача по определению пьезокоэффициентов вязкости данных смазочных материалов.

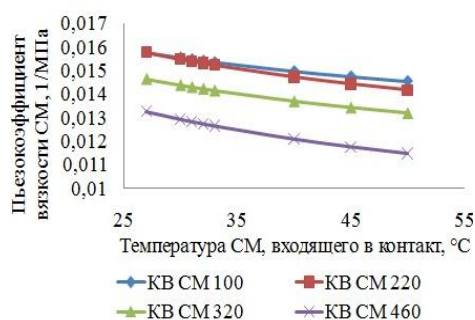


а

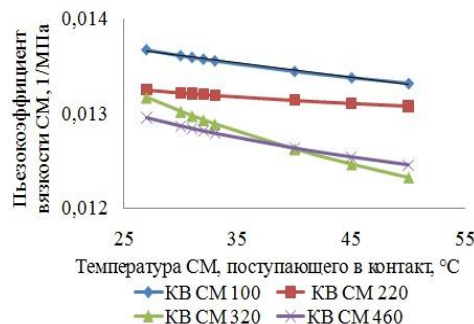


б

Рис. 2. Изменение температуры на контакте в ПК для четырёх классов вязкости смазочного материал: а – суммарная скорость качения в контакте 2,9 м/с; б – суммарная скорость качения в контакте 7,92 м/с

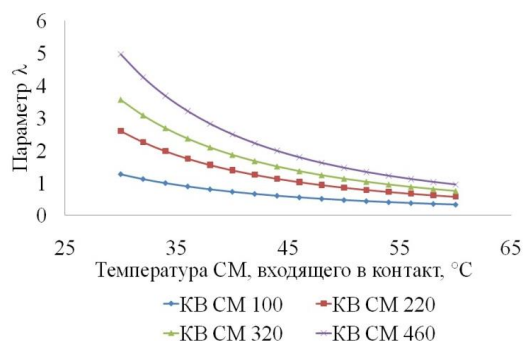


а

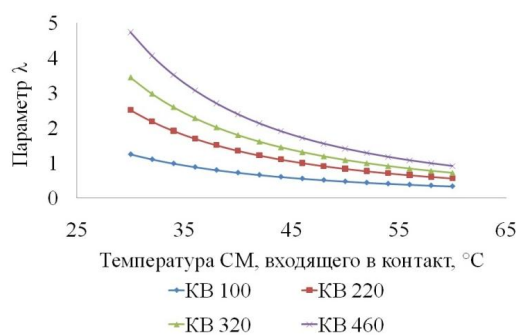


б

Рис. 3. Значения пьезокоэффициента: а – суммарная скорость качения 2,9 м/с; б – суммарная скорость качения 7,92 м/с



а



б

Рис. 4. Зависимость параметра λ от температуры смазочного материала, поступающего в зону контакта для четырёх классов вязкости: а – суммарная скорость качения в контакте 2,9 м/с; б – суммарная скорость качения в контакте 7,92 м/с

Параметр λ является критерием для оценки долговечности подшипниковых опор. При $\lambda > 1$ фактическая долговечность ПК превышает расчётную. При $\lambda > 3$ реализуется режим ЭГД-смазки. Создание этого ЭГД – режима позволит в несколько раз повысить расчётную долговечность.

Аналитически-экспериментальные данные были обработаны посредством программы Statistica, в результате чего были получены зависимости интенсивности разогрева минерального масла (рис. 5), учёт которых позволяет принимать меры по предотвращению перегрева ПК в подшипниковых опорах валков.

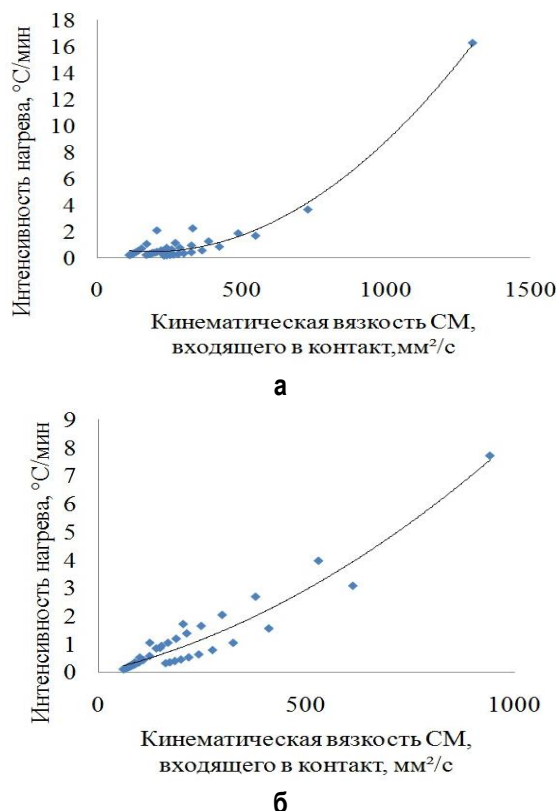


Рис. 5. Интенсивность роста температуры в зависимости от КВ СМ: а – суммарная скорость качения в контакте 2,9 м/с; б – суммарная скорость качения в контакте 7,92 м/с

Высокая интенсивность роста температуры ведёт к тепловому разогреву подшипникового узла до температур, превышающих допустимые значения.

Закключение

При выборе минерального масла в подшипниковые опоры валков прокатных клетей «кварто» соответствующего класса вязкости необходимо учитывать не только возможность реализа-

ции на контакте в подшипниках качения, но и возникающую при этом температуру, которая может достигать 140–160°C.

Температуру в зоне контакта можно регулировать температурой минерального масла, поступающего в подшипниковый узел.

Расчёты по полученным зависимостям с использованием алгоритма, представленного в работе [10] для подшипниковых опор валков клетей «кварто» стана-тандем 2000 холодной прокатки, показали, что при КВ 220 обеспечивается наиболее низкое тепловыделение в контактной зоне подшипников качения, исключающее их перегрев, и соответственно повышение ресурса подшипниковых опор на 40–45%.

Список литературы

1. Математическое моделирование теплового состояния подшипникового узла тянущих роликов стана 2000 ОАО «ММК» холодной прокатки / Ячиков И.М., Жиркин Ю.В., МIRONENKOV Е.И., Султанов Н.Л. // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. 2014. № 1 (4). С. 29–36.
2. Дудоров Е.А., Жиркин Ю.В. Модернизация подшипникового узла с целью продления его ресурса // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2007. № 4. С. 94–96.
3. Исследование и разработка режимов смазывания подшипниковых узлов рабочих валков стана 2000 горячей прокатки / Платов С.И., Терентьев Д.В., Жиркин Ю.В., МIRONENKOV Е.И., Мезин И.Ю. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. № 2. С. 98–100.
4. Влияние вязкости минеральных масел на температурный режим подшипниковых узлов рабочих валков прокатных станов / Дудоров Е.А., Резванов С.Б., Жиркин Ю.В., МIRONENKOV Е.И. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2006. № 1. С. 58–60.
5. Жиркин Ю.В., Пузик Е.А. Аналитическо-экспериментальное определение параметров ЭГД-смазки в подшипниках качения опор рабочих валков стана 2000 горячей прокатки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2010. № 4. С. 52–56.
6. Пузик Е.А., Жиркин Ю.В., МIRONENKOV Е.И. Исследование условий реализации эластогидродинамической смазки в подшипниках качения рабочих валков прокатных клетей кварто // Производство проката. 2011. № 7. С. 44–46.
7. Жиркин Ю.В., МIRONENKOV Е.И., Дудоров Е.А. Физическое моделирование режима смазки подшипниковых узлов рабочих валков прокатных станов. // Изв. вузов. Черная металлургия. 2007. № 4. С. 54–56.
8. Перель Л.Я., Филатов А.А. Подшипники качения: Расчёт, проектирование и обслуживание опор: справочник. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1992. 608 с.
9. Жиркин Ю.В. Надежность, эксплуатация и ремонт металлургических машин: учеб. пособие. Москва: Теплотехник, 2009. 336 с.
10. Пузик Е.А., Жиркин Ю.В. Алгоритм подбора смазочного материала для смазывания подшипниковых опор рабочих валков клетей кварто // Механическое оборудование металлургических заводов. 2015. № 1 (4). С. 55–60.

INCREASE IN THE LIFE OF BEARING SUPPORTS OF FOUR-HIGH STANDS DURING THEIR MAINTENANCE

Puzik Ekaterina Aleksandrovna – Master's degree student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: ekshalimova@mail.ru.

Zhirkin Yuri Vasilyevich – Ph.D. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: girkin@yandex.ru.

Filatov Aleksandr Andreyevich – D.Sc. (Eng.), Chief Researcher, State Scientific Center VNIIMETMASH, Moscow, Russia. E-mail: smm93@list.ru.

Abstract. This paper focuses on maintenance of four-high rolling stands, gives data on maintenance of such facilities at OJSC MMK, describes the technique for finding the effect of various lubricants on the rolling bearing life, contains calculations to select an optimum viscosity grade of a lubricant to increase the life of the bearing units of facilities under study in certain work conditions.

Keywords: Bearing supports of mill stands, rolling bearing life, maintenance of bearing supports.

References

1. Yachikov I. M., Zhirkin Yu. V., Mironenkov E. I., Sultanov N. L. Mathematical modeling of the thermal state of the bearing unit of pinch rolls on cold rolling mill 2000 at OJSC MMK. *Matematicheskoe i programnoe obespechenie sistem v promyshlennoy i sotsial'noy sferakh* [Mathematical support and software of systems in industrial and social spheres]. 2014, no. 1 (4), pp. 29-36.
2. Dudorov E. A., Zhirkin Yu. V. Modernization of the bearing unit to extend its resource. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2007, no. 4, pp. 94-96.
3. Platov S. I., Terentyev D. V., Zhirkin Yu. V., Mironenkov E. I., Mezin I. Yu. Research and development of lubrication modes of bearing assemblies of work rolls on hot rolling mill 2000. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2012, no. 2, pp. 98-100.
4. Dudorov E. A., Rezvanov S. B., Zhirkin Yu. V., Mironenkov E. I. Effect of mineral oil viscosity on temperature of bearing units of rolling mill work rolls. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2006, no. 1, pp. 58-60.
5. Zhirkin Yu. V., Puzik E. A. Analytical and experimental determination of parameters of EHD lubrication in rolling bearings of supports of work rolls of hot rolling mill 2000. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2010, no. 4, pp. 52-56.
6. Puzik E. A., Zhirkin Yu. V., Mironenkov E. I. Study of the conditions of implementation of elastohydrodynamic lubrication in rolling bearings of work rolls of four-high stands. *Proizvodstvo prokata* [Production of steel products]. 2011, no. 7, pp. 44-46.
7. Zhirkin Yu. V., Mironenkov E. I., Dudorov E. A. Physical modeling of the lubrication mode of the bearing units of rolling mill work rolls. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy]. 2007, no. 4, pp. 54-56.
8. Perel L. Ya., Filatov A. A. [Rolling bearings: Calculation, design and maintenance of supports: Guide. 2nd ed.]. Moscow: Mashinostroenie, 1992, 608 p.
9. Zhirkin Yu. V. *Nadezhnost', ehkspluatatsiya i remont metallurgicheskikh mashin: uchebnoe posobie* [Reliability, operation and maintenance of metallurgical machines: a textbook]. Moscow: Teplotekhnika, 2009, 336 p.
10. Puzik E. A., Zhirkin Yu. V. Algorithm for the selection of a lubricant for lubrication of bearing supports of work rolls of four-high mill stands. *Mekhanicheskoe oborudovanie metallurgicheskikh zavodov* [Mechanical equipment of metallurgical plants]. 2015, no. 1 (4), pp. 55-60.

Пузик Е.А., Жиркин Ю.В., Филатов А.А. Повышение долговечности подшипниковых опор прокатных клетей «кварто» при их техническом обслуживании // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №3. С. 83–88.

Puzik E.A., Zhirkin Yu.V., Filatov A.A. Increase in the life of bearing supports of four-high stands during their maintenance. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 3, pp. 83–88.

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

УДК 623.53+62.503.56

ОПТИМАЛЬНЫЕ ТОПЛИВОСБЕРЕГАЮЩИЕ РЕЖИМЫ НАГРЕВА НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК В МЕТОДИЧЕСКИХ ПЕЧАХ

Парсункин Б.Н.¹, Андреев С.М.¹, Жадинский Д.Ю.², Ахметова А.У.¹¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия² ООО «Электроремонт», Магнитогорск, Россия

Аннотация. Рассматривается теоретическое обоснование целесообразности и необходимости для уменьшения удельных затрат топлива замены существующего общепринятого способа распределения расходов топлива по зонам методических печей на универсальный топливосберегающий способ, обеспечивающий гарантированное оптимальное автоматизированное управление нагревом металла с соблюдением всех технологических и конструктивных ограничений при производстве горячекатаного широкополосного листового проката.

Ключевые слова: оптимальный топливосберегающий нагрев, температурный режим, непрерывнолитая заготовка, нагревательная печь, температурная траектория, нагрев заготовок перед прокаткой.

Введение

Особенно актуальной проблема снижения удельного расхода условного топлива (УРУТ) становится при производстве широкополосного горячекатаного листового проката для выполнения больших намеченных программ в оборонной, судостроительной и трубной отраслях промышленности.

Решение поставленной задачи рассмотрено на примере рекомендуемой реализации топливосберегающего управления режимом нагрева непрерывнолитых заготовок в отечественных методических печах современного высокопроизводительного широкополосного стана горячей прокатки (ШСГП) 2000 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ММК).

Замена общепринятого способа распределения расходов топлива на новый топливосберегающий режим, гарантирующий оптимальное автоматизированное управление нагревом металла

Своевременное и бесперебойное обеспечение прокатного стана гарантированно нагретыми до требуемого теплового состояния заготовками является приоритетной задачей отделения нагревательных печей ШСГП. Решение этой важной проблемы значительно усложняется существенно нестационарным режимом работы стана. Изменение часовой производительности стана 2000 ОАО «ММК» в течение суток приведено на рис. 1.

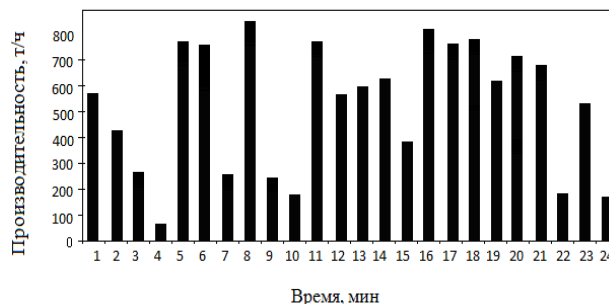


Рис. 1. Изменение часовой производительности стана 2000 ОАО «ММК» в течение суток

Анализ полученных данных показывает, что производительность стана изменяется от 50 до 800 т/ч.

В нестационарных условиях работы нагревательных печей проводимые на стане мероприятия, например подача на нагрев неостывших при разливке заготовок, способствуют снижению УРУТ. Однако эффективность проводимых мероприятий сдерживается наличием противоречия между используемым общепринятым способом распределения расходов топлива по зонам печи и топливосберегающим оптимальным способом, заключающимся в следующем.

Нагрев слабовых непрерывнолитых заготовок в методических печах ШСГП можно представлять как нагрев по толщине плоской пластины, т.е. температурное поле в заготовке можно рассматривать как одномерное [1, 2].

$$C'(t) = \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(t) \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \right], \quad (1)$$

где $t(x, \tau)$ – температура пластин по оси x , К; $C'(t)$ – удельная объемная теплоемкость, Дж/(м·К); x – пространственная координата, $0 < x < \sigma$, м; σ – половина толщины заготовки, м; τ – текущее время $0 \leq \tau \leq T$, с; T – заданное время нагрева, с.

При симметричном нагреве граничные условия в центре при $x = 0$ будут определены условием

$$\frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} = 0, \quad (2)$$

где $t(0, \tau)$ – температура центра заготовки, К.

При граничных условиях третьего рода (задан закон теплообмена на поверхности) имеем [3]

$$\frac{\partial t(\sigma, \tau)}{\partial x} = \alpha(\tau) \cdot [t_{zc}(\tau) - t_{нов}(\tau)], \quad (3)$$

где $t_{нов}(\tau) = t(\sigma, \tau)$ – температуры на поверхности пластины, К; $t_{zc}(\tau)$ – температура греющей среды (рабочего пространства), К; $\alpha(\tau)$ – коэффициент теплоотдачи (Вт/м²·град), определяется по формуле

$$\alpha(\tau) = \frac{\left[\left(\frac{t_{zc}(\tau)}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{нов}(\tau)}{100} \right)^4 \right] + \alpha_{конв} (t_{zc}(\tau) - t_{нов}(\tau))}{t_{zc}(\tau) - t_{нов}(\tau)}, \quad (4)$$

где $\alpha_{конв}$ – коэффициент теплопередачи конвекцией, Вт/(м²·град); $\sigma_{прив}$ – приведенный коэффициент излучения, рассчитываемые по формуле В.Н. Тимофеева [4]:

$$\sigma_{прив} = \sigma_0 \varepsilon_m \cdot \varepsilon_{zc} \cdot \frac{k_{y2l} (1 - \varepsilon_{zc}) + 1}{k_{y2l} (1 - \varepsilon_{zc}) \cdot [\varepsilon_m + \varepsilon_{zc} (1 - \varepsilon_m)] + \varepsilon_{zc}}, \quad (5)$$

где σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м²·К); ε_m – интегральная степень черноты поверхности нагреваемого металла; ε_{zc} – интегральная степень черноты результирующего источника излучения, приведенная к температуре

греющей среды; k_{y2l} – угловой коэффициент излучения огнеупорной кладки на тепловоспринимающую поверхность заготовки.

Дополнительно известно начальное ($\tau = 0$) и конечное ($\tau = T$) распределения температуры по сечению заготовки:

$$t(0, x) = t^o(x); \quad t(T, x) = t^K(x), \quad (6)$$

где $t^o(x)$, $t^K(x)$ – параболического вида функции соответственно начального и конечного температурного распределения по сечению заготовки [1].

Управляющим воздействием в системе автоматизированного оптимального топливосберегающего управления нагревом является «расход топлива», а выходным управляемым параметром является «характеристическая температура греющей среды», пропорциональная расходу топлива.

Динамика процесса преобразования расхода топлива в температуру греющей среды можно выразить уравнением

$$\frac{dt_{zc}(\tau)}{d\tau} = \frac{1}{T_0} [U(\tau) - t_{zc}(\tau)], \quad (7)$$

где $U(t) = K_n \cdot V_T(\tau)$ – характеристическая температура управления, К; $V_T(\tau)$ – текущий расход топлива, м³/ч; K_n – коэффициент передачи по каналу «расход топлива – характеристическая температура», К·ч/м³;

T_0 – постоянная времени, характеризующая инерционность процесса теплопередачи по каналу «управляющее воздействие – температура греющей среды $t_{zc}(\tau)$ ».

Для решения одномерного уравнения теплопроводности с соответствующими начальными, конечными и граничными условиями использован численный метод решения по неявной четырехточечной разностной схеме [3].

Используемый метод решения позволяет получить расчетные траектории изменения по времени $U(\tau)$; $t_{zc} = t_{zc}(\tau)$; $t_{нов}(\tau) = t(\sigma, \tau)$; $t_{ц}(\tau) = t(0, \tau)$, где $t_{ц}(\tau)$ – изменение температуры центра заготовки.

Критерием (целью) оптимальности топливосберегающего управления процессом нагрева металла является минимизация затрат топлива при нагреве заготовок от начального $t^0(x)$ до конечного $t^k(x)$ состояния за заданное время нагрева $0 \leq \tau \leq T$ [5].

Этот критерий можно выразить в виде функционала [5–8]:

$$I = \int_0^T U^2(\tau) d\tau \rightarrow \min. \quad (8)$$

Требуется определить такое управление $U(\tau)$, чтобы по окончании заданного времени нагрева T критерий (8) принимал наименьшее из возможных значений.

Для решения поставленной задачи использован метод максимума Л.С. Понтрягина. В соответствии с данным методом необходимое условие оптимальности управления определено специальной H -функцией следующего вида [6–12]:

$$H = \varphi_0 \cdot U^2(\tau) + \frac{1}{T_0} \varphi_{\tau c}(\tau) \cdot [U(\tau) - t_{\tau c}(\tau)] + \varphi(\tau, 0) + \frac{a}{\lambda} \cdot \varphi(\tau, \sigma) \cdot [t_{\tau c}(\tau) - t_{\text{пов}}(\tau)] + \frac{\lambda}{c'} \frac{\partial \varphi(\tau, x)}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{dx^2}, \quad (9)$$

где φ_0 , $\varphi(x, \tau)$, $\varphi(\tau, \sigma)$, $\varphi_{\tau c}(\tau)$, $\varphi(\tau, 0)$ – сопряженные переменные, определяемые в процессе частного дифференцирования функции (9) по переменным, к которым вычисляются сопряженные [7,10].

Условие оптимальности управления определяется в соответствии с принципом максимума следующим выражением:

$$\frac{\partial H}{\partial U} = 2U(\tau) \cdot \varphi_0 + \frac{\varphi_{\tau c}(\tau)}{T_0} = 0, \quad (10)$$

где $\varphi_0 = -1$ по определению [7].

Значит, в итоге имеем

$$U_{\text{онм}}(\tau) = \frac{\varphi_{\tau c}}{2T_0}. \quad (11)$$

Существование решения следует из физического смысла задачи при $T \geq T_{\text{мин}}$, где $T_{\text{мин}}$ –

минимальное время необходимое для перевода теплового состояния заготовки из начального $t^0(x)$ в конечное $t^k(x)$.

В соответствии с принципом максимума Л.С. Понтрягина [5, 6] для оптимальности управления необходимо существование таких непрерывных функций $\varphi(x, \tau)$, $\varphi(\sigma, \tau)$, $\varphi_{\tau c}(\tau)$, при которых функция $H(\tau)$ в каждый момент времени достигает максимума.

Значительную трудность при определении $U_{\text{онм}}(\tau)$ представляет определение начальных значений отмеченных функций сопряженных переменных.

Для решения этой проблемы Андреевым С.М. предложен метод квадратичной интерполяции [7], позволивший перевести решения поставленной задачи из области интуитивно-вариационной в область обоснованного формализованного решения. Это обеспечивает определение оптимальной топливосберегающей температурной траектории используемого контролируемого параметра нагрева для каждой заготовки в темпе с реальным процессом [13].

Расчетные траектории изменения температурных параметров при оптимальном топливосберегающем режиме управления нагревом непрерывнолитой заготовки с учетом изменения теплофизических характеристик стали сляба толщиной 2500 мм за заданное время 150 мин от начального температурного состояния $t_{\text{пов}}(\tau=0)=t_{\text{ц}}(\tau=0)=100$ до конечного температурного состояния $t_{\text{пов}}(T)=t_{\text{ц}}(T)=1250^\circ\text{C}$ при среднемассовой температуре $t_{\text{см}}(T)=1250^\circ\text{C}$ без учета ограничения [12, 13] представлены на рис. 2.

Полученные траектории оптимального топливосберегающего управления процессом нагрева подчиняются общей закономерности: при наличии резерва времени на нагрев интенсификация нагрева должна происходить на конечном интервале назначенного времени.

Интенсивное снижение нагрева в конце назначенного времени объясняется жесткими условиями достижения конечного температурного состояния нагреваемой заготовки в рассматриваемом случае: $t_{\text{пов}}(\tau)=t_{\text{ц}}(\tau)=1250^\circ\text{C}$.

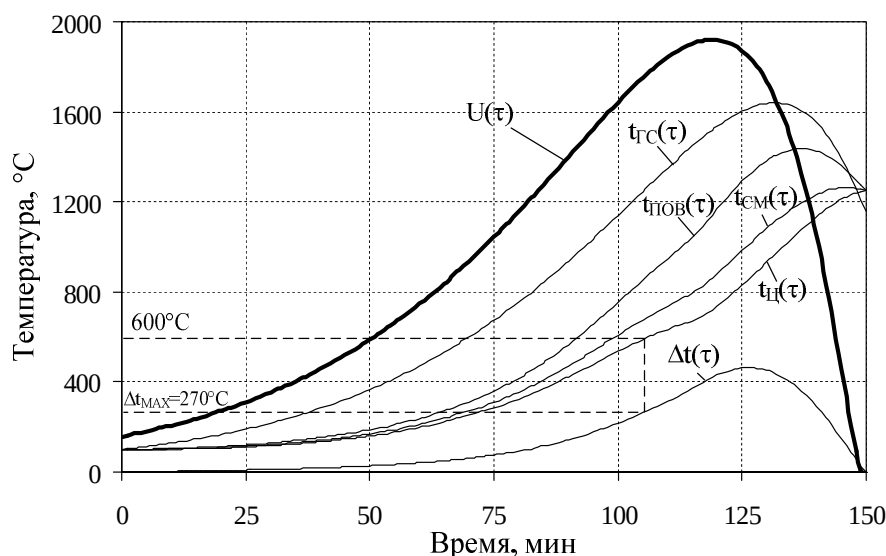


Рис. 2. Расчетные траектории изменения температурных параметров $U(\tau)$, $t_{гр}(\tau)$, $t_{пов}(\tau)$, $t_{см}(\tau)$, $t_{ц}(\tau)$, и $\Delta t(\tau) = t_{пов}(\tau) - t_{ц}(\tau)$ при энергосберегающем управлении режимом нагрева «холодной» непрерывной заготовки, без учета технологических ограничений

В производственных условиях при реализации топливосберегающих оптимальных режимов нагрева возникают проблемы, связанные с необходимостью учета различных технологических и конструкционных ограничений [14]. Это ограничения: на максимально и минимально возможные значения управляющего воздействия U_{max} и U_{min} ; на максимально допустимое значение температуры греющей среды (рабочего пространства) $t_{гр}^{max}$; на максимально допустимую температуру поверхности (точнее, поверхностного слоя окалины) нагреваемой заготовки $t_{пов}^{max}$; ограничение на максимально допустимый текущий перепад температуры по сечению $\Delta t_{max} = t_{пов}(\tau) - t_{ц}(\tau)$, действующее до достижения температуры центра $t_{ц} = 550 - 600^\circ\text{C}$.

Соблюдение ограничений снижает эффективность оптимального топливосберегающего управления нагревом, т.к. вынуждает на значительных интервалах текущего времени нагрева отказываться от реализации оптимальных температурных расчетных траекторий [7].

В производственных условиях существуют дополнительные причины, препятствующие эффективному использованию оптимальных энергосберегающих режимов нагрева. Основные из них следующие:

1. При существующей общепринятой концепции распределения расходов топлива по зонам печи, ориентированной на поддержание максимальной производительности, наличие на

выходе томительных зон (зон выдержки) с тепловой нагрузкой 10–12% от общей, принципиально, затрудняет реализацию топливосберегающего режима нагрева [15].

Принятая концепция, безусловно, правильная при работе ШГСП с производительностью 800–1000 т/ч сохраняется и при производительности стана 400–600 т/ч, приводя к неоправданно повышенным затратам топлива.

2. Соблюдение основополагающего условия оптимального топливосберегающего режима нагрева объективно увеличивает (в условиях нестационарного режима работы стана) вероятность выдачи на стан недогретой заготовки и возникновения аварийной ситуации, когда потери от остановки стана будут несравнимо большими, чем возможная экономия от снижения затрат топлива на нагрев [16].

3. В условиях нестационарной работы стана, когда производительность непредсказуемо изменяется от 50 до 800 т/ч (см. рис. 1) технологи просто вынуждены иметь в печи необходимый, но часто неоправданно повышенный запас нагретого металла. Поэтому для обеспечения этого запаса интенсивный нагрев переносится в первые отапливаемые зоны. Это приводит к повышенным затратам тепла с отходящими продуктами сгорания и повышенным потерям дорогостоящего металла с окислением при длительной выдержке, при высокой температуре [15].

Анализ результатов математического и физического моделирования программой и технической реализации топливосберегающего оптимального управления процессом нагрева [7] показал, что даже в условиях нестационарной работы высокопро-

изводительного ШСПП, когда в методических печах одновременно нагреваются различные партии заготовок, отличающиеся по теплофизическому состоянию, использование топливосберегающего оптимального управления нагревом возможно после реализации следующих мероприятий:

1. Улучшение информационного обеспечения процесса нагрева за счет: а) использования системы прогнозирования общего времени нагрева на момент подачи в печь очередной заготовки с точностью ± 8 мин и коррекции этого времени с учетом плановых, скрытых и аварийных простоев [7]; б) использования системы программно-инструментального контроля текущего теплового состояния и прогнозирования ожидаемой температуры раската каждой заготовки перед выдачей из печи с точностью $\pm 20^\circ\text{C}$ [6]; в) использования в качестве контролируемого температурного параметра вместо температуры греющей среды $t_{\text{гс}}(\tau)$ температуры поверхности нагреваемого металла (точнее, поверхностного слоя окалины) $t_{\text{пов}}(\tau)$ [16].

Эти мероприятия не требуют значительных капитальных затрат, но способствуют снижению величины УРУТ [9].

2. Использование вместо общепринятого способа распределения расходов топлива по зонам методической печи универсального топливосберегающего способа, обеспечивающего в зависимости от реальной производственной ситуации автоматический переход от режима минимальной продолжительности нагрева на режим оптимального топливосберегающего управления нагревом. Это мероприятие требует определенных затрат на реконструкцию системы трубопроводов распределения газа и воздуха по зонам печи и, возможно, приобретение новых технических средств автоматического контроля и управления [15, 17].

Суть этого мероприятия заключается в разбиении отапливаемой части печи на одинаковые по длине и производимой тепловой мощности индивидуально управляемые зоны. Применительно к отечественным печам стана 2000 ОАО «ММК» это мероприятие заключается в использовании в верхних зонах горелок ГР 750 вместо ГР 350. Для более точного соблюдения оптимальных топливосберегающих расчетных температурных траекторий контролируемого параметра для каждой нагреваемой заготовки целесообразно экономически обоснованное увеличение числа зон нагрева.

В реальных нестационарных условиях работы методических печей сложность реализации оптимального топливосберегающего управления процессом нагрева заключается в том, что при

фиксированной длине зоны на все расположенные в зоне заготовки, часто с различными оптимальными температурными расчетными траекториями, приходится одно управляющее воздействие – расход топлива $V_T(\tau)$ в зону.

Текущее значение расхода топлива поддерживается зонным автоматическим регулятором теплового режима путем стабилизации заданного значения температурного контролируемого параметра или «уставки регулятора». Для обеспечения гарантированного топливосберегающего режима нагрева заготовок с различным тепловым состоянием целесообразно в качестве уставки выбирать самую высокую требуемую температуру для самой «холодной» заготовки или для заготовки, нагрев которой должен быть осуществлен за самое меньшее прогнозируемое время.

В этом случае нагрев «горячих» заготовок в зоне будет осуществляться не по оптимальному топливосберегающему режиму, а по режиму с соблюдением всех технологических ограничений. В итоге это исключит возможную остановку стана на подогрев металла за счет некоторого увеличения общего расхода топлива на печи.

Характерное для начального этапа освоения печей стана 2000 ОАО «ММК» распределение во времени приведенного к длине зоны расхода топлива $V(\tau)$, температуры поверхности $t_{\text{пов}}(\tau)$ и центра $t_{\text{ц}}(\tau)$ для нагреваемой заготовки толщиной 250 мм с начальной температурой 200°C за время 240 мин приведено на рис. 3 [7].

Заготовка при таком общепринятом способе распределения расходов топлива была нагрета практически за 150 минут, а остальное время – 90 минут до выдачи выдерживалась в печи, подвергаясь повышенному окислению при затратах топлива на поддержание высокого температурного состояния.

В результате проводимых мероприятий, в том числе и по уменьшению величины приведенного к длине 1 зоны расхода топлива с 330 до 140 ($\text{м}^3/\text{ч}$)/м, удалось уменьшить величину УРУТ до 56,5 кг/т при 70% заготовок горячего посада.

Результаты расчета распределения уставок температуры греющей среды $t_{\text{гс}}^3$, измеряемой термомпарами, по зонам методической печи стана 2000 ОАО «ММК» при существующем способе распределения топлива по зонам представлены на рис. 4.

Результаты расчета распределения уставок $t_{\text{гс}}^3(\tau)$ по зонам печи при реализации оптимального топливосберегающего управления нагрева «холодных» заготовок представлены на рис. 5.

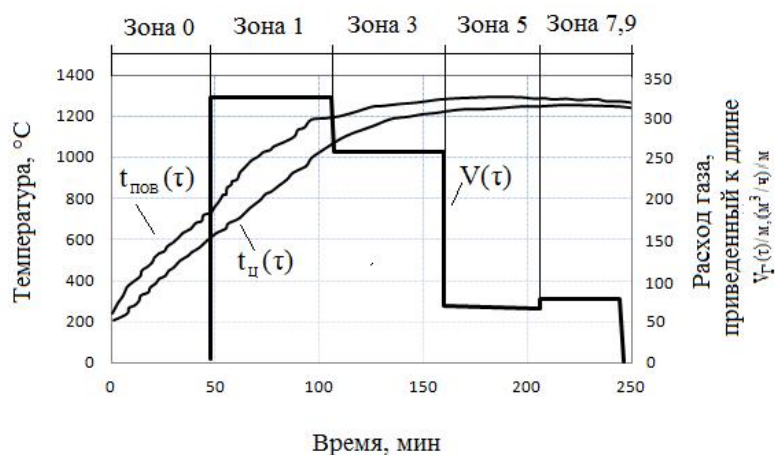


Рис. 3. Изменение во времени приведенного расхода топлива $V(\tau)$, $t_{\text{пов}}(\tau)$, $t_{\text{ц}}(\tau)$ при нагреве непрерывнолитых заготовок в печах стана 2000 ОАО «ММК» (при УРУТ 62,9 кг/т за 240 мин)

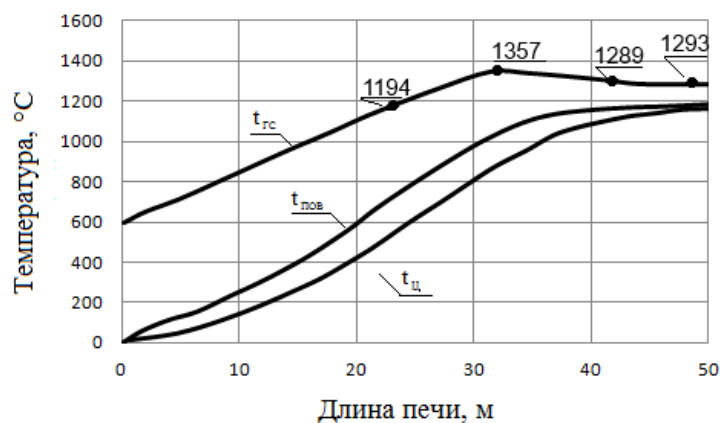


Рис. 4. Результаты расчета уставок температуры в зонах методической печи стана 2000 ОАО «ММК» для существующего способа распределения расходов топлива (время нагрева 220 мин, УРУТ 56,5 кг/т)

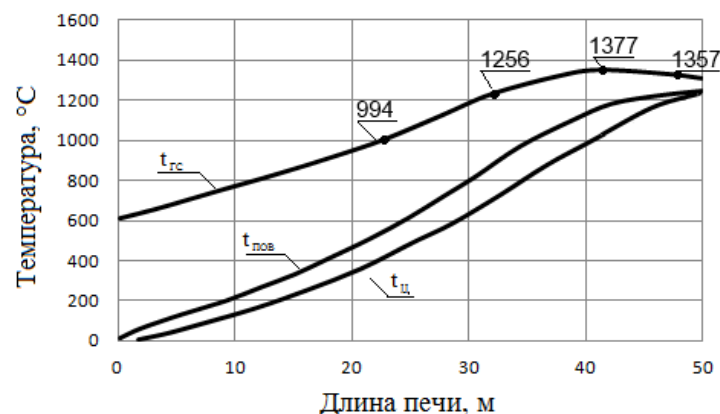


Рис. 5. Результаты расчета уставок температуры в зонах методической печи стана 2000 ОАО «ММК» для оптимального топливосберегающего нагрева заготовок холодного посада (время нагрева 220 мин, УРУТ 53,4 кг/т)

Расчет произведен при выполнении условия замены в зонах № 5, 7, 9 горелок ГР-350 на ГР-750 и использовании в качестве контролируемо-

го параметра температуры греющей среды $t_{\text{гр}}(\tau)$, измеряемой термопарой ТПР.

Использование в качестве контролируемого

параметра $t_{\text{пов}}^3(\tau)$ за счет повышения целесообразности, а главное – оперативности, управления позволит получить дополнительное снижение УРУТ на 1,5÷3% [9].

Точками на рис. 4 и 5 показаны места уставок датчиков температуры греющей среды (термопар) по длине рабочего пространства отечественных печей верхних зон стана 2000 ОАО «ММК».

Анализ полученных результатов показывает, что даже при использовании в качестве контролируемого параметра очень инерционной температуры греющей среды $t_{\text{гс}}^3(\tau)$ применение оптимального гарантированного топливосберегающего режима управления нагревом в условиях нестационарной работы ШСГП обеспечивает снижение УРУТ на 3.1 кг/т или на 5.5%, даже при нагреве «холодных» заготовок, и позволяет уменьшить потери дорогостоящего металла при его окислении.

Заключение

Использование универсального оптимального топливосберегающего способа распределения расходов топлива при нагреве непрерывнолитых заготовок в условиях нестационарной работы ШСГП позволит: сократить величину УРУТ на 4–6% ,обеспечить гарантированный нагрев заготовок за счет оптимального управления расходами топлива по зонам печи в зависимости от реальной производственной ситуации на стане, с одновременным снижением потерь дорогостоящего металла при окислении.

Список литературы

1. Тайц Н.Ю. Технология нагрева стали. М.: Металургиздат, 1962. 557 с.
2. Малый С.А. Экономичный нагрев металла. М.: Металлургия, 1967. 192 с.
3. Арутюнов В.В., Бухмиров В.В., Крупенников С.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей. М.: Металлургия, 1990. 239 с.
4. Маковский В.А., Лаврентик И.И. Алгоритмы управления нагревательными печами. М.: Металлургия, 1977. 183 с.
5. Бутковский А.Г., Гольдфарб Э.М., Генкин Э.С. Применение принципа аксимуа для оптимизации температурного режима печей // Изв. вузов. Черная металлургия. 1967. №3.
6. Математическая теория оптимальных процессов / Л.С. Понтрягин, В.Г. Болтянский, Р.В. Гамкрелидзе и др. М.: Наука, 1983. 393 с.
7. Андреев С.М., Парсункин Б.Н. Оптимизация режимов управления нагревом заготовок в печах проходного типа: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. 376 с.
8. Болтянский В.Г. Математические методы оптимального управления. М.: Наука, 1969. 408 с.
9. Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Ахметов Т.У. Энергосберегающий нагрев непрерывнолитых заготовок в нестационарных условиях работы методических печей // Сталь. 2014. №1. 48–52 с.
10. О реализации энергосберегающих режимов нагрева непрерывнолитых заготовок перед прокаткой / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, Д.Ю. Жадинский и др. // Сталь. 2005. №12. С. 44–46.
11. Андреев С.М., Парсункин Б.Н., Ахметов У.Б. Разработка и исследование работы системы энергосберегающего управления нагревом заготовок в методических печах листопрокатных станов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. №1. С. 122–128 с.
12. Андреев С.М., Парсункин Б.Н. Экспериментальное исследование эффективности энергосберегающих оптимальных режимов нагрева металла // Автоматизированные технологии и производства. 2014. №6. С. 134–143.
13. Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Бушманова М.В. Оптимизация управления тепловым режимом нагревательных печей // Сталь. 2003. №9. С. 65–67.
14. Парсункин Б.Н., Андреев С.М. Учет ограничений по термонапряжению при энергосберегающем нагреве непрерывнолитых заготовок // Изв. вузов. Черная металлургия. 2003. №4. С. 58–62.
15. Андреев С.М., Парсункин Б.Н., Жадинский Д.Ю. Информационное обеспечение энергосберегающих режимов нагрева непрерывнолитых заготовок перед прокаткой // Металлург. 2005. №2. С. 64–67.
16. Андреев С.М., Парсункин Б.Н. Система оптимального управления тепловым режимом промышленных печей // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. №2. С. 18–29.
17. Снижение удельного расхода топлива при управлении тепловым режимом по температуре поверхности нагреваемого металла / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, Т.Г. Обухова и др. // Автоматизированные технологии и производства. 2013. №5. С. 302–309.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

OPTIMAL FUEL-EFFICIENT MODES OF HEATING CONTINUOUSLY CAST BILLETS IN CONTINUOUS REHEATING FURNACES

Parsunkin Boris Nikolaevich – D.Sc. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Andreev Sergey Mikhailovich – Ph.D. (Eng.), Head of the Automated Control System Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Zhadinsky Dmitry Yurievich – Engineer, LLC Elektroremont, Magnitogorsk, Russia.

Akhmetova Aigul Uralovna – Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: Lbp40032@yandex.ru.

Abstract. This paper contains a theoretical rationale for feasibility of, and need for replacement of an existing conventional method of distribution of fuel consumption in zones of continuous reheating furnaces for a universal fuel-efficient method ensuring a guaranteed optimal automatic control of heating metal in compliance with all technological and design constraints, when manufacturing hot-rolled wide sheet products, to reduce the unit cost of fuel.

Keywords: Optimal fuel-efficient heating, temperature, fuel distribution, continuously cast billets, heating zones, temperature trajectory, length of the furnace area.

References

1. Taits N. Yu. *Tekhnologiya nagreva stali* [Steel heating technology]. Moscow: Metallurgizdat, 1962, 557 p.
2. Maly S. A. *Ehkonomichnyj nagrev metalla* [Low-energy heating of metals]. Moscow: Metallurgy, 1967, 192 p.
3. Arutyunov V. V., Bukhmirov V. V., Krupennikov S. A. *Matematicheskoe modelirovanie teplovoj raboty promyshlennykh pechej* [Mathematical modeling of industrial furnace thermal performance]. Moscow: Metallurgy, 1990, 239 p.
4. Makovsky V.A., Lavrentik I.I. *Algoritmy upravleniya nagrevatel'nymi pechami* [Heating furnace control algorithms]. Moscow: Metallurgy, 1977, 183 p.
5. Butkovsky A.G., Goldfarb E.M., Genkin E.S. Application of the maximum principle to optimize temperature conditions of furnaces. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy]. 1967, no. 3, 173 p.
6. Pontryagin L.S., Boltyansky V.G., Gamkrelidze R.V. et al. *Matematicheskaya teoriya optimal'nykh protsessov* [A mathematical theory of optimum processes]. Moscow: Science, 1983, 393 p.
7. Andreev S. M., Parsunkin B. N. *Optimizatsiya rezhimov upravleniya nagrevom zagotovok v pechakh prokhodnogo tipa: monografiya* [Optimization of billet heating control modes in conveyor furnaces: monograph]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2013, 376 p.
8. Boltyansky V. G. *Matematicheskie metody optimal'nogo upravleniya* [Mathematical methods of optimum control]. Moscow: Science, 1969, 408 p.
9. Parsunkin B. N., Andreev S. M., Akhmetov T.U. Energy-saving heating of continuously cast billets in non-stationary operating conditions of continuous reheating furnaces. *Stal'* [Steel]. 2014, no. 1, pp. 48-52.
10. Parsunkin B. N., Andreev S. M., Zhadinsky D.Yu. et al. On implementation of energy-saving modes of heating of continuously cast billets before rolling. *Stal'* [Steel]. 2005, no. 12, pp. 44-46.
11. Andreev S. M., Parsunkin B. N., Akhmetov U.B. Development and research of operation of the energy-saving billet heating control system in continuous reheating furnaces of sheet rolling mills. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2014, no. 1, pp. 122-128.
12. Andreev S. M., Parsunkin B. N. Pilot study of efficiency of energy-saving optimum metal heating modes. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva* [Computer-aided technologies and manufacturing]. 2014, no. 6, pp. 134-143.
13. Parsunkin B. N., Andreev S. M., Bushmanova M. V. Optimization of heating furnace thermal mode control. *Stal'* [Steel]. 2003, no. 9, pp. 65-67.
14. Parsunkin B. N., Andreev S. M. Factoring into thermal stress constraints at energy-saving heating of continuously cast billets. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy]. 2003, no. 4, pp. 58-62.
15. Andreev S. M., Parsunkin B. N., Zhadinsky D.Yu. Information support of energy-saving modes of heating of continuously cast billets before rolling. *Metallurg* [Metallurgist]. 2005, no. 2, pp. 64-67.
16. Andreev S. M., Parsunkin B. N. A thermal mode optimum control system for industrial furnaces. *Mashinostroenie: setevoy ehlektronnyj nauchnyj zhurnal* [Mechanical engineering: network electronic scientific journal]. 2013, no. 2, pp. 18-29.
17. Parsunkin B. N., Andreev S. M., Obukhova T.G. et al. Decrease in specific fuel consumption when controlling the thermal mode based on the temperature of the heated metal surface. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva* [Computer-aided technologies and manufacturing]. 2013, no. 5, pp. 302-309.

Оптимальные топливосберегающие режимы нагрева непрерывнолитых заготовок в методических печах / Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Жадинский Д.Ю., Ахметова А.У. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №3. С. 89–96.

Parsunkin B.N., Andreev S.M., Zhadinsky D.Yu., Akhmetova A.U. Optimal fuel-efficient modes of heating continuously cast billets in continuous reheating furnaces. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 3, pp. 89–96.

ЭКОЛОГИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

УДК 66.074.6

СТРАТЕГИЯ И ТАКТИКА ПРОВЕДЕНИЯ ПРИРОДООХРАННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ ПРЕДПРИЯТИЯМИ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Черчинцев В.Д., Коротецкая В.А., Зуева Т.Ю.

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

Аннотация. В статье рассмотрена возможность применения метода экспертных оценок для разработки стратегии и тактики проведения природоохранных мероприятий крупными промышленными предприятиями, в частности предприятиями черной металлургии с полным технологическим циклом. Приняв за основу методику реализации природоохранных мероприятий, применяемую для научного прогнозирования развития региональных эколого-экономических систем (РЭЭС), подбирая на основе фактических данных функционирования промышленного предприятия оценочные показатели, излагается методика определения приоритетных природоохранных мероприятий для эффективного и устойчивого развития конкретного предприятия черной металлургии, каким является ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

Ключевые слова: природоохранные мероприятия, экспертные оценки, коэффициент согласованности, критерий оптимальности, уровень достоверности, выбросы загрязняющих веществ, водные ресурсы, промышленные отходы, переработка шлаков.

Введение

Предприятия черной металлургии входят в состав отраслей промышленности, оказывающих значительное негативное воздействие на окружающую среду, вызывая нарушение отдельных элементов экосистем территорий, подвергающихся воздействию этих предприятий, и загрязнение всех субстанций указанных экосистем. Особенно остро стоит проблема снижения негативного воздействия предприятий черной металлургии на окружающую среду, выражающегося в нарушении почвенно-земляного слоя, изменении ландшафта прилегающих территорий и гидросистем, связанных с шламохранилищами, шламоотстойниками и загрязнением поверхностных водоемов. В этом случае, зная величину нанесенного предотвращенного ущерба, определить эколого-экономическую эффективность деятельности этих предприятий можно по формуле [1]

$$P_{\text{общ}} = \frac{\Pi_6 \pm Y}{\Phi_0 + \Phi_{\text{о6}}} \cdot 100 = \frac{E_1 + E_2 \pm Y}{H + K_0}, \quad (1)$$

где $P_{\text{общ}}$ – общая рентабельность предприятия; Π_6 – балансовая прибыль; Φ_0 – средняя стоимость основных производственных фондов; $\Phi_{\text{о6}}$ – средние

остатки нормируемых оборотных средств; E_1 – прибыль от реализации товарной продукции, процент к объему реализованной основных видов металлопродукции; E_2 – результаты прочих видов реализованной продукции, процент к общему объему реализации; $+Y$ – предотвращенный экономический ущерб; $-Y$ – наносимый экономический ущерб.

Однако при разработке стратегии и тактики проведения природоохранных мероприятий в регионах с эффективно функционирующими предприятиями черной металлургии с целью их дальнейшего устойчивого развития и развития всего региона при минимальном воздействии на окружающую среду необходимо применить методы определения приоритетных мероприятий, последовательность их проведения и инвестирования.

Использование метода экспертных оценок для разработки стратегии и тактики проведения природоохранных мероприятий

Наиболее простым и доступным методом эвристического моделирования при решении указанной проблемы может быть метод экспертных оценок, применяемый часто для прогнозирования развития региональных эколого-экономических систем [1]. В случае применения этого метода для какого-либо крупного предприятия черной ме-

таллургии алгоритм решения задачи может включать: систему определяющих показателей (X_i), диапазон изменения этих показателей; подбор экспертов при условии их профессиональной компетенции, их значимости и взаимной независимости; составление матрицы априорной информации; определение коэффициента согласованности C при его изменении в диапазоне от 0 до 1; определение уровня достоверности коэффициента согласованности по $\chi^2_{расч.}$ и табличного $\chi^2_{табл.}$, взятого из справочника по статистике.

Рассмотрим конкретный пример решения этой задачи для такого крупного предприятия, как ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат». В качестве определяющих показателей примем: X_1 – объем отходов производства, содержащих токсичные вещества; X_2 – величину капитальных вложений, выделенных на природоохранные мероприятия; X_3 – уровень экологической безопасности основных технологических процессов; X_4 – технический уровень систем защиты окружающей среды от выбросов и сбросов загрязняющих веществ; X_5 – уровень обеспеченности квалифицированными кадрами, способными решать экологические проблемы; X_6 – уровень загрязнения окружающей среды транспортом и производственными объектами других промышленных предприятий, находящихся на территории Магнитогорского промышленного узла.

По данным, представленным независимыми экспертами, составляем матрицу априорной информации (см. таблицу), исходя из того, что число экспертов определяется по соотношению $m = n + 2$, где m – число независимых экспертов, а n – число оценочных показателей.

Матрица априорной информации, составленная по данным независимых экспертов при оценке деятельности ОАО «ММК» в период с 2000 по 2014 годы (данные приведены в качестве условного примера)

X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	Шифр эксперта	Сумма неразличимых рангов
5	4	1	3	2	5	1	$T_1 = 2 \cdot 5 = 10$
3	5	4	2	1	4	2	$T_2 = 2 \cdot 4 = 8$
2	4	5	3	4	1	3	$T_3 = 2 \cdot 4 = 8$
4	3	3	4	3	2	4	$T_4 = 3 \cdot 3 + 2 \cdot 4 = 17$
5	4	5	2	1	4	5	$T_5 = 2 \cdot 5 + 2 \cdot 4 = 18$
2	1	5	2	4	1	6	$T_6 = 2 \cdot 2 + 2 \cdot 1 = 6$
4	3	2	5	5	3	7	$T_7 = 2 \cdot 5 + 2 \cdot 3 = 16$
2	4	5	3	3	2	8	$T_8 = 3 \cdot 2 + 2 \cdot 2 = 10$
27	28	30	24	23	22		$\sum_{j=1}^m T_j = 93$

Приняв за критерий оптимальности максимум уровня рентабельности природоохранных мероприятий, оценку уровня рентабельности определяем в интервале $P_{ij} = \{1 \div 10\}$.

Далее решение этой задачи проводим в следующей последовательности, определяя:

– среднее значение оценочных показателей по выражению

$$\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i; \quad (2)$$

– сумму квадратов отклонений от среднего значения каждого из показателей

$$\Delta^2 = \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2; \quad (3)$$

– сумму неразличимых рангов (см. таблицу)

$$\sum_{j=1}^m T_j = (T_1 + T_2 + \dots + T_8); \quad (4)$$

– коэффициент согласованности между условными экспериментами

$$C = \frac{\Delta^2}{\frac{1}{2} \cdot n \cdot m \cdot (n^3 - 1) - m \sum_{j=1}^m T_j}; \quad (5)$$

– уровень достоверности коэффициента согласованности по χ^2 -распределению

$$\chi^2_{расч} = \frac{\Delta^2}{\frac{1}{12} \cdot n \cdot m \cdot (n^3 - 1) - \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^m T_j}. \quad (6)$$

Подставляя в эти математические выражения и формулы условные значения вышеуказанных параметров, получаем следующие результаты:

$$\bar{P} = 25,6; \quad \Delta^2 = 49,36; \quad \sum_{j=1}^m T_j = 93; \quad C = 0,011;$$

$$\chi^2_{расч.} = 0,051.$$

Поскольку $\chi^2_{расч.} < f^2_{табл.}$, так как $\chi^2_{табл.} = 0,6$, то числовое значение коэффициента согласованности находится на достаточном уровне достоверности, и руководство предприятия и региона может расставить природоохранные мероприятия по приоритетам их значимости

в следующей последовательности:

$$X_3 \rightarrow X_2 \rightarrow X_1 \rightarrow X_4 \rightarrow X_5 \rightarrow X_6.$$

Согласованность условных значений природоохранных мероприятий, полученных виртуально, с реальными результатами выполнения природоохранных мероприятий, полученных в ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»

Анализ результатов природоохранной деятельности ОАО «ММК» и результатов, полученных расчетным путем с применением условных значений оценочных показателей, свидетельствует о достаточно высоком уровне сходимости этих результатов. Так, замена технологического процесса получения стали в двухванных агрегатах на процесс получения стали в кислородных конверторах позволила сократить выбросы загрязняющих веществ в атмосферу в 3,7 раза, что согласуется с оценочным показателем X_3 выше-рассмотренной методики.

В настоящее время природоохранный комплекс ОАО «ММК» состоит из 445-ти газоочистных установок различной мощности, из 43 локальных оборотных циклов водоснабжения и 32 водоочистных сооружений, а также из 6-ти комплексов по переработке металлургических шлаков. Практически на всех природоохранных объектах за последние 10 лет выполнена реконструкция или произведены капитальные ремонты.

Капитальные затраты на реконструкцию существующих и строительство новых природоохранных объектов за последние пять лет составили 250 млн долл. На содержание природоохранных объектов ежегодно тратится более 500 млн долл.

В ОАО «ММК» принята и реализуется долгосрочная Экологическая программа, рассчитанная на период до 2015 года. Программа включает мероприятия, направленные на снижение вредного воздействия металлургического производства на окружающую среду, повышение эффек-

тивности производства при улучшении его экологических показателей. Программой предусмотрено затратить в 2013–2015 годах на возведение новых и реконструкцию существующих природоохранных сооружений более 4 млрд долл. Успешное выполнение этой программы позволило сократить валовые выбросы загрязняющих веществ в атмосферу с 319 тыс. т/год в 2000 году до 219 – в 2014 водопотребление из водохранилища реки Урал сократить в 1,25 раза с одновременным увеличением оборотного водоснабжения в 1,26 раза; объем переработки шлака в 2014 году увеличить в 2,42 раза по сравнению с 2006 годом [2], что также согласуется с оценочными показателями, используемыми в методе экспертных оценок.

Заключение

Вышеприведенные данные доказывают целесообразность применения метода экспертных оценок для определения стратегии и тактики проведения природоохранных мероприятий на предприятиях черной металлургии с полным технологическим циклом. В свою очередь, такой подход к определению приоритетных природоохранных мероприятий будет способствовать решению многих социально-экологических проблем и устойчивому развитию самих предприятий и промышленных регионов, в состав которых входят эти предприятия [3].

Список литературы

1. Нестеров П.М., Нестеров А.П. Экономика природопользования и рынок: учебник для вузов. М.: Закон и право; ЮНИТИ, 1997. 413 с.
2. Черчинцев В.Д., Дробный О.Ф., Бурмистров И.С. Реализация принципов рационального природопользования в производственной деятельности ОАО «ММК» // Сталь. 2012. №2. С. 147–149.
3. Drobny O.F., Charchintsev V.D. Development and implementation of measures to improve environmental situation within Magnitogorsk industrial hub // Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University. 2013. №5. С.74–78.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

STRATEGY AND TACTICS OF ENVIRONMENTAL MEASURES CARRIED OUT BY IRON AND STEEL ENTERPRISES

Cherchintsev Vyacheslav Dmitrievich – D.Sc. (Eng.), Professor, Honored Worker of Higher School of Russia, Head of the Industrial Ecology and Life Safety Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7 3519 298 515. E-mail: eco_safe@magtu.ru.

Korotetskaya Valentina Alexandrovna – Assistant Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Zueva Tatiana Yurievna – Assistant Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: eco_safe@magtu.ru.

Abstract. The article deals with an expert evaluation method applied for development of a strategy and tactics of environmental measures carried out by large industrial enterprises, in particular iron and steel works. Having taken the method of environmental measures implementation as a basic one for scientific forecasting of development of regional ecological and economic systems (REES) and sorted out estimates on the basis of actual data about performance of industrial enterprises, the authors state a method to determine priorities of environmental measures for efficient and sustainable development of a particular iron and steel enterprise, that is the Open Joint Stock Company Magnitogorsk Iron and Steel Works.

Keywords: Environmental measures, expert evaluation, concordance coefficient, criterion of optimality, signifi-

cance level, pollutant emissions, water resources, industrial wastes, slag processing.

References

1. Nesterov P.M., Nesterov A.P. *Ehkonomika prirodoopol'zovaniya i rynek: uchebnik dlya vuzov* [Economics of Nature Management and Market: a textbook for universities]. Moscow: Law and Right; YuNITI, 1997, 413 p.
2. Cherchintsev V. D., Drobny O. F., Burmistrov I. S. Putting into life principles of rational nature management in the production activity of OJSC MMK. *Stal'* [Stal]. 2012, no. 2, pp. 147-149.
3. Drobny O.F., Cherchintsev V.D. Development and implementation of measures to improve the environmental situation within the Magnitogorsk industrial hub. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2013, no. 5, pp. 74-78.

Черчинцев В.Д., Коротецкая В.А., Зуева Т.Ю. Стратегия и тактика проведения природоохранных мероприятий предприятиями черной металлургии // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №3. С. 97–100.

Cherchintsev Vy.D., Korotetskaya V.A., Zueva T.Yu. Strategy and tactics of environmental measures carried out by iron and steel enterprises. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 3, pp. 97–100.

УПРАВЛЕНИЕ ПЕРСОНАЛОМ

УДК 65.01

ДИНАМИКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПУБЛИКАЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ ПРОФЕССОРСКО-ПРЕПОДАВАТЕЛЬСКОГО СОСТАВА МАГНИТОГОРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ИМ. Г.И. НОСОВА

Логунова О.С., Егорова Л.Г., Королева В.В.

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

Аннотация. В работе рассматривается динамика показателей публикационной активности научно-педагогических работников университета за три года эксплуатации рейтинговой системы. В качестве результатов работы приведено изменение структуры показателей, в частности сокращение их количества и разделение финансирования проектов по публикации работ в журналах, индексируемых в российских и зарубежных наукометрических системах. Оценка результатов выполнена для крупных подразделений университета, таких как институты и факультеты, каждой кафедры и персоны. Показана инвариантность итогового показателя публикационной активности в общем рейтинге научных коллективов и отдельных ученых, ведущих активную научную деятельность. Доказано, что упрощение системы показателей ведет к расширению количества сотрудников (до 91%), способных достигать установленных показателей. Выявлены достоинства и недостатки существующей системы оценки в каждый период функционирования. Предложена коррекция календарного графика учета и мониторинга публикационной активности профессорско-преподавательского состава для проведения мероприятий, способствующих внедрению эффективного управления публикационной активностью и достижения заданного уровня показателей. Полученные результаты демонстрируют необходимость развития и совершенствования системы публикационной активности профессорско-преподавательского состава в высших учебных заведениях.

Ключевые слова: публикационная активность, оценка деятельности преподавателя, индекс Хирша, проекты публикационной активности, динамика показателей.

Введение

В настоящее время огромное внимание уделяется статусу российских высших учебных заведений на мировых научных образовательных рынках. Вводимые новые формы отчетности и мониторинга о деятельности научно-образовательных учреждений (Ежегодный отчет университета перед Минобрнауки России, Ежегодный мониторинг Минобрнауки России эффективности деятельности образовательной организации высшего образования, Ежегодный отчет университета перед Минобрнауки России по форме «Показатели деятельности образовательной организации высшего образования, подлежащей самообследованию») выдвигают высокие требования к оценке квалификации научно-педагогических работников. В связи с этим каждая научно-образовательная организация уделяет большое внимание вопросам разработки и реализации системы внутреннего рейтингования профессорско-преподавательского состава

[1, 2]. При разработке таких систем уделяется большое внимание следующим вопросам: определение состава рейтинговых показателей [3, 4], разработка шкал измерения показателей [3, 5], разработка систем автоматизированного учета показателей [4], анализ полученных результатов [7, 8] и принятие решений об управлении деятельностью профессорско-преподавательского состава в следующих периодах [9, 10].

Одной из существенных составляющих рейтинговой оценки деятельности научно-педагогического работника являются показатели публикационной активности. Все чаще в новых нормативных и отчетных документах появляются показатели, характеризующие количественную сторону публикационной деятельности, такие как количество публикаций и количество цитирований, а также показатель, связывающий количество и качество публикаций, – индекс Хирша. Реже являются востребованными показатели, характеризующие качество публикации и

издания, в которых опубликованы работы. К таким показателям чаще всего относят импакт-факторы журналов, показатели самоцитируемости, статус журналов, количество цитирований отдельных публикаций.

В связи с важностью показателей публикационной активности в деятельности ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» в реальном времени проводятся работы по анализу, систематизации и управлению публикационной деятельностью научно-педагогических работников вуза. Целью проводимых работ является повышение эффективности апробации результатов научных исследований в открытой печати, расширение научного сотрудничества между научными коллективами внутри вуза и между вузами, привлечение инвесторов к проведению совместных научно-исследовательских работ.

1. Динамика структуры показателей публикационной активности профессорско-преподавательского состава университета

На основе результатов анализа публикационной активности профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВПО «МГТУ» в 2013 и 2014 годах, приведенных в работе [7], было принято решение о реструктуризации показателей публикационной активности для рейтинга 2015 года.

Для проведения рейтинговой оценки и стимулирования профессорско-преподавательского состава принято три решения:

- упростить состав показателей публикационной активности;
- разделить финансирование проектов по стимулированию научных работ, представленных в российском индексе научного цитирования (РИНЦ) и в зарубежных базах научного цитирования *Web of Science* и *Scopus*;
- изменить группу и весовой коэффициент показателей публикационной активности в рейтинге профессорско-преподавательского состава.

Динамика структуры показателей публикационной активности за три года приведена на **рис. 1**. Количество показателей 2013 года составило 14 значений (из них 10 показателей по системе РИНЦ), в 2014 году – 10 значений (из них 6 по системе РИНЦ) и 2015 году – 2 показателя по системе РИНЦ. Сокращение количества показателей было произведено в сторону консолидации взаимосвязанных показате-

телей, характеризующих качество публикационной активности преподавателя. Полная структура показателей 2013 и 2014 годов приведена в работе [7].

Без изменения осталась формула для вычисления баллов по публикационной активности преподавателя с учетом сокращения количества компонент:

$$K_i = \sum_j^2 \alpha_j \cdot k_{ij}, i = \overline{1,2}, \quad (1)$$

где K_i – показатель публикационной активности i -го преподавателя; α_j – кортеж весовых коэффициентов для каждого структурного показателя, назначенных рейтинговой комиссией и утвержденных руководителем университета; k_{ij} – значение j -го показателя публикационной активности для i -го преподавателя.

Однако в дополнение измененной структуры изменилась группа, в которой находится показатель публикационной активности. В 2013 и 2014 годах показатель отнесен к рейтинговой группе квалификации работника с весовым коэффициентом 0,3, в 2015 году – к рейтинговой группе активности работника с коэффициентом 0,7.

Все показатели публикационной активности в наукометрических системах *Web of Science* и *Scopus* исключены из системы рейтинговой оценки и стимулируются согласно новому проекту на основе нового внутреннего нормативного документа менеджмента качества «О стимулировании публикационной активности в наукометрических системах *Web of Science* и *Scopus*». Эффективность разделения показателей представлена в работе [11].

На **рис. 2** приведена динамика структуры показателей по количеству опубликованных статей и значению индекса Хирша за три года.

Неуклонно возрастает доля показателей, характеризующих количество опубликованных статей, учтенных в РИНЦ. Соотношение между долей опубликованных статей и долей значения индекса Хирша пока не является стабильным и принимает значений от 5,01 до 22,95%. Соотношение между долями количества публикаций и значениями индекса Хирша показывает усиление показателя по количеству опубликованных статей до 8,5 раз.

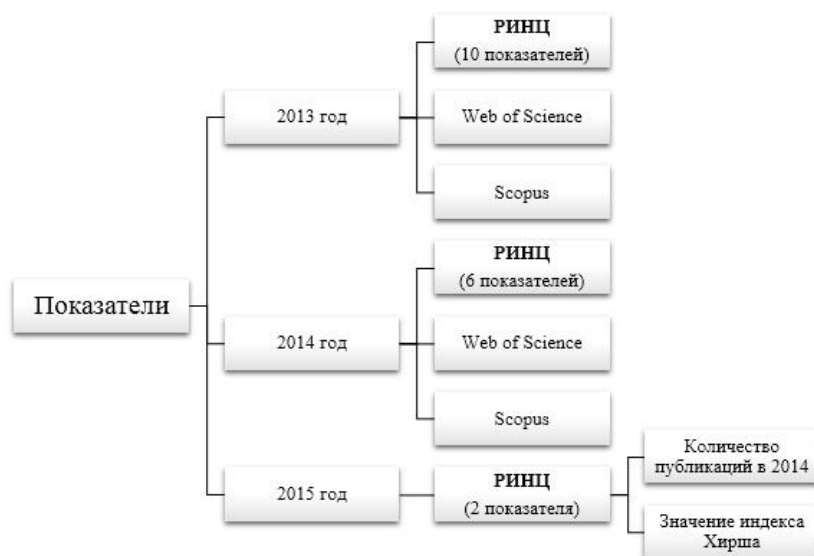


Рис. 1. Динамика структуры показателей публикационной активности профессорско-преподавательского состава

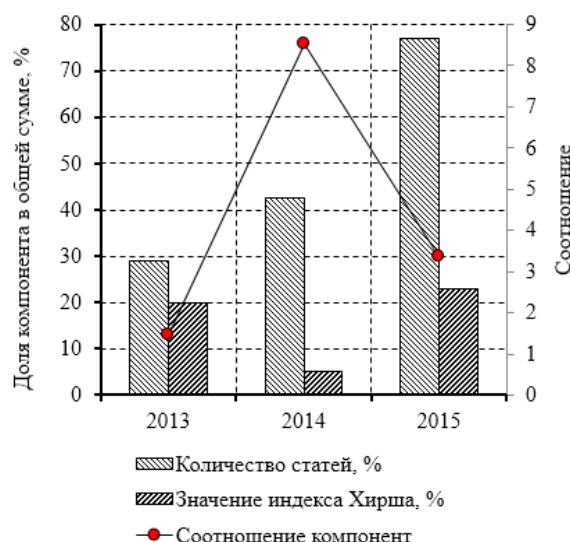


Рис. 2. Динамика структуры показателей публикационной активности

В результате был сформирован массив записей, содержащий сведения о преподавателе: фамилия, имя, отчество, принадлежность к кафедре и институту/факультету, ученая степень, кортеж показателей публикационной активности и вычисленные значения публикационной активности по (1).

Полученная информация в 2013, 2014 и 2015 годах позволила провести статистический анализ результатов по университету в целом, по крупным подразделениям – университету и институтам/факультетам, кафедрам и отдельным персонам.

2. Результаты анализа публикационной активности профессорско-преподавательского состава крупных подразделений

В табл. 1 приведены результаты описательной

статистики публикационной активности университета в целом за 2013, 2014 и 2015 годам. Реструктуризация показателей публикационной активности и их перемещение из группы «Квалификация» в группу «Активность» не привело к существенному изменению суммарного значения балла по университету. Таким образом, можно считать, что статус показателя публикационной активности в общей сумме баллов не изменен.

На рис. 3 представлены диаграммы, характеризующие вклад каждого подразделения университета в общую сумму баллов публикационной активности (рис. 3, а) и относительного прироста по отношению к значению показателей за 2014 год (рис. 3, б).

На **рис. 3** введены обозначения для подразделений университета в 2014 году: БФ – Белорецкий университет; ИГД и Т – институт горного дела и транспорта; ИИФ и ИЯ – институт истории, филологии и иностранных языков; ИММ и М – институт металлургии, машиностроения и материалообработки; ИПП и СР – институт педагогики, психологии и социальной работы; ИСА и И – институт строительства, архитектуры и искусства; ИЭ и У – институт экономики и управления; ИЭ и АС – институт энергетики и автоматизированных систем; ФСХ и Б – факультет стандартизации, химии и биотехнологий; ФФК и СМ – факультет физической культуры и спортивного мастерства; ФМФ – физико-математический факультет.

Таблица 1
Обобщенные показатели публикационной активности преподавателей университета

Показатель	2013 г.	2014 г.	2015 г.
Количество ППС	758	1251	1074
Среднее количество баллов	53,86	44,76	16,43
Максимальное количество баллов	1112,9	632,4	286,0
Минимальное количество баллов	0	0	0
Доля нулевых значений суммы, %	39,7	29,6	22,3
Средний индекс Хирша по РИНЦ	0,697	1,12	1,94
Общая сумма баллов	47144,1	56060,6	21016
Сумма с учетом группы в рейтинге	14143,23	16818,18	14711,20

В абсолютных показателях увеличение или уменьшение доли в общей сумме является незначительным и лежит в интервале $[-3,55; 3,12]$ процентов. В относительных единицах произошел существенный рост показателей (до 86%) относительно значений 2014 года, что свидетельствует об активизации работы в структурном подразделении (**рис. 4**).

Средний процент регистрации научно-педагогических работников в системе РИНЦ в 2015 году достиг 87,5 % и увеличился на 8,5 % по сравнению с 2014 и на 23 % по сравнению 2013 годами. На **рис. 5** показано среднее значение индекса Хирша для каждого подразделения и относительное приращение по отношению к значениям 2014 года.

Наблюдается безусловный рост среднего значения индекса Хирша по всем подразделениям университета. Несмотря на изменение структуры показателей, остаются лидирующими два крупнейших подразделения университета: институт металлургии, машиностроения и материалообработки, институт энергетики и автоматизированных систем.

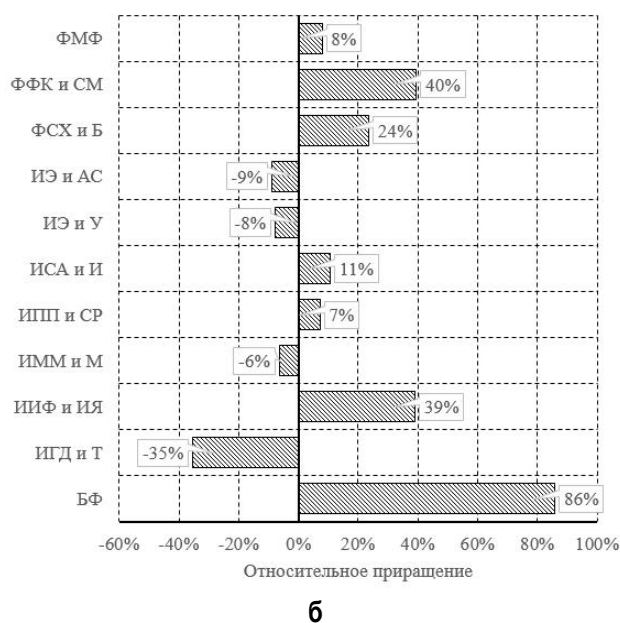
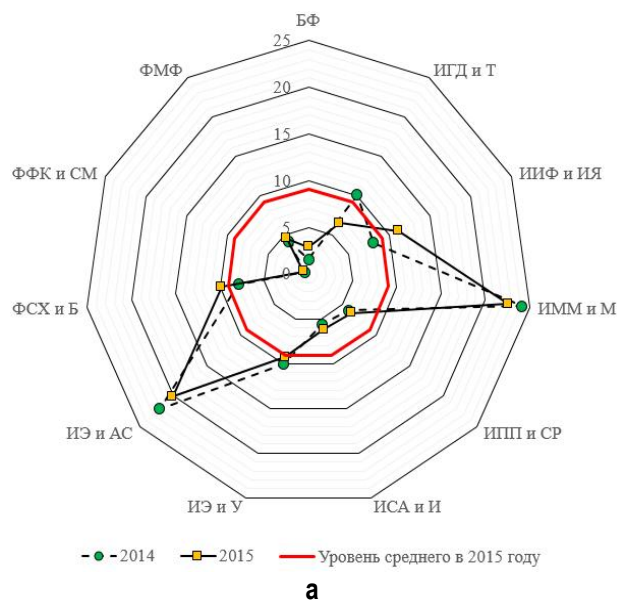


Рис. 4. Динамика суммарного балла публикационной активности:
а – доля в общей сумме баллов;
б – относительное приращение доли

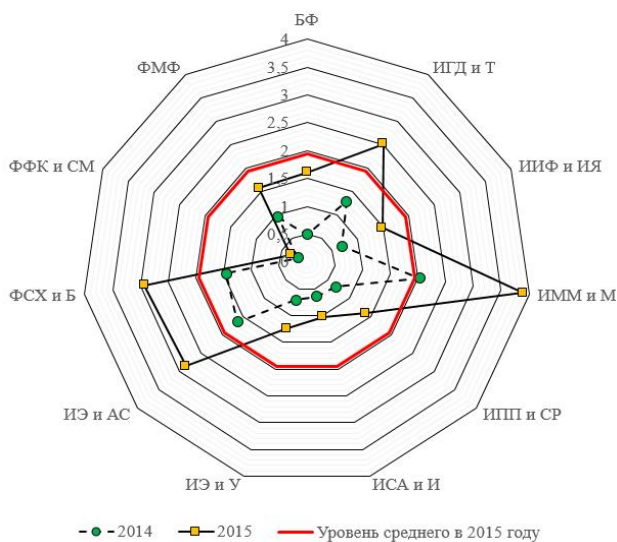


Рис. 5. Среднее значение индекса Хирша преподавателей университета по подразделениям: а – в 2014 и 2015 годах; б – относительное приращение

3. Результаты анализа публикационной активности профессорско-преподавательского состава кафедр университета

В 2014–2015 году в университете функционировала 81 кафедра. Группировка сведений по кафедрам университета позволила определить кафедры с высоким уровнем публикационной активности (рис. 6). Фактически 10 кафедр университета обеспечивают 34,63 % публикационной активности против 34,44 % в 2014 году. В список наиболее активных кафедр постоянно и независимо от структуры показателей входят: кафедра обработки металлов давлением (ОМД),

машиностроительный и металлургических технологий (М и МТ); литейного производства и материаловедения (ЛП и М); металлургии черных металлов (МЧМ); вычислительной техники и программирования (ВТ и П). Стабильная работа этих кафедр позволяет быть инвариантными к изменению структуры показателей.

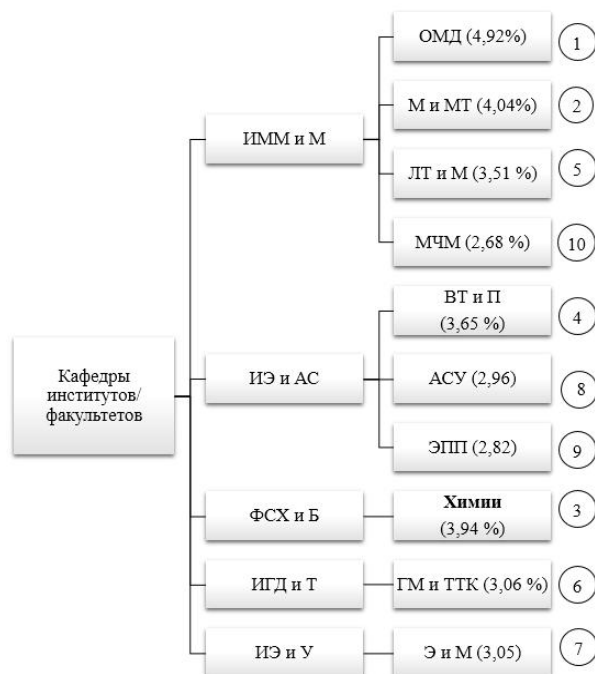


Рис. 6. Группы кафедр с высоким уровнем публикационной активности и распределение баллов по кафедрам университета

На рис. 6 дополнительно введены обозначения: АСУ – кафедра автоматизированных систем управления; ЭПП – кафедра электроснабжения промышленных предприятий; ГМ и ТТК – кафедра горных машин и транспортно-технологических комплексов; Э и М – кафедра экономики и маркетинга; 1÷10 – положение кафедры в общем рейтинге по абсолютному количеству баллов публикационной активности.

Изменение структуры показателей публикационной активности в 2015 года привело не только к количественным, но к качественному изменению доли вклада баллов публикационной активности в рейтинге деятельности кафедр. На рис. 7 представлена диаграмма выполнения работ за рейтинговый период – 2014 и 2015 гг. Как следует из диаграммы, процесс выполнения работ имеет траекторию, отличную от идеального равномерного хода работ. В 2014 году 50 % объема выполнялось 19 кафедрами, в 2015 году – 17 кафедрами. В то же время 50 % кафедр в 2014 году было выполнено 81,78 % всех работ, в 2015 – 81,75 %.

На **рис. 7** дополнительно введены обозначения: 1 – область 50 % выполнения работ в 2015 году; 2 – область работ, которая выполняется 50 % кафедрами университета.

На **рис. 8** и **9** показана зависимость рейтинга преподавателя от значения показателя публикационной активности.

На **рис. 8** выделены области, определяющие рейтинговое пространство, которое характеризует сжатие или растяжение шкал рейтинга и публикационной активности для каждой кафедры. Угол наклона линейного тренда определяет вклад публикационной активности в рейтинг [7]. Например, на **рис. 9, а** показаны результаты ана-

лиза рейтинга кафедры, для которой изменение показателей привело к существенному изменению общего балла рейтинга (при увеличении публикационной активности на 1 балл происходит увеличение на 0,407 рейтинга в 2013 году, на 0,68 – в 2014 и на 0,96 – 2015 году). Для показателей кафедры, приведенных на **рис. 9, б**, произошли существенные изменения только для 2015 года (при увеличении публикационной активности на 1 балл происходит среднее увеличение рейтинга преподавателя на 0,604 балла в 2013 году и на 0,915 балла в 2015 году). На **рис. 9** уравнения сверху вниз соответствуют результатам 2013, 2014 и 2015 года.

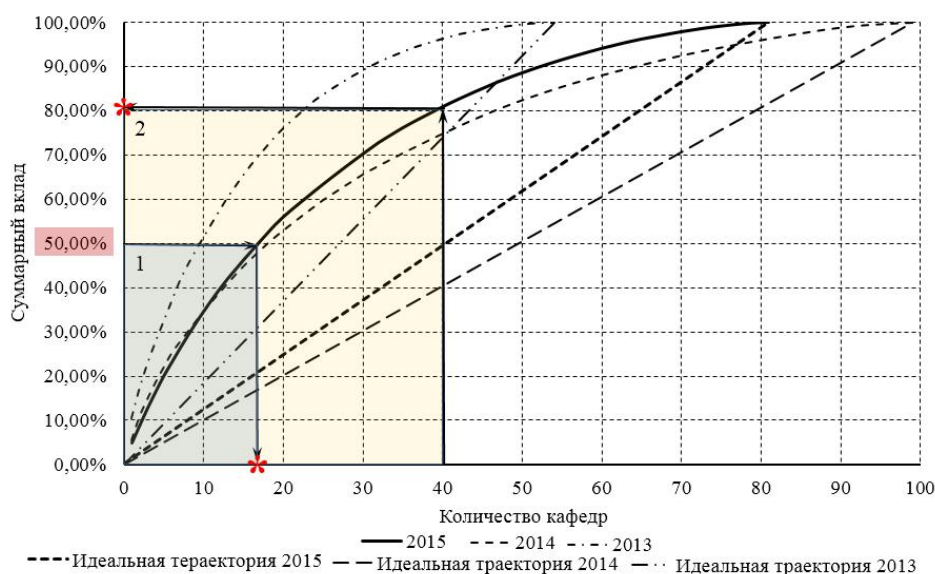


Рис. 7. Диаграмма выполненных работ коллективами кафедр университета

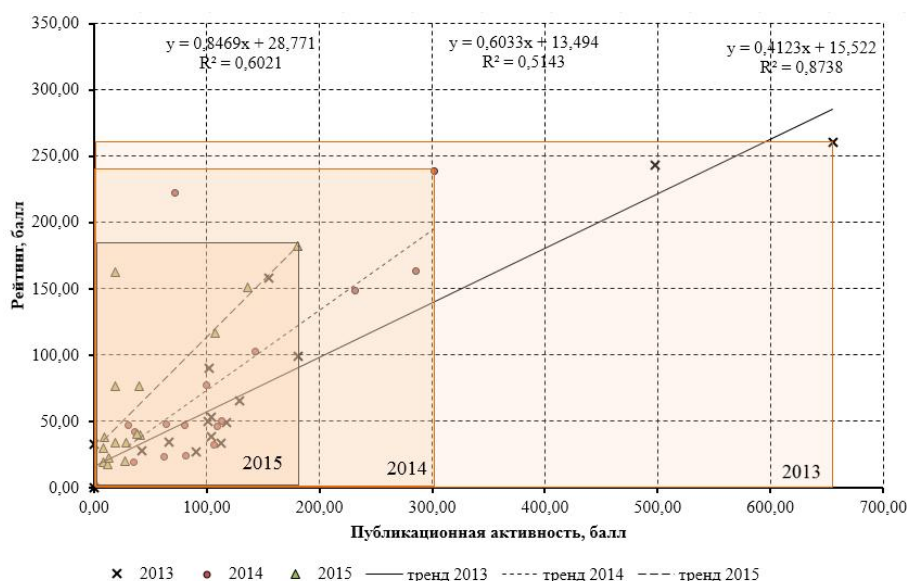


Рис. 8. Зависимость формирования рейтинга преподавателя от балла публикационной активности с выделением областей пространства баллов для кафедры, находящейся в постоянном списке лидеров

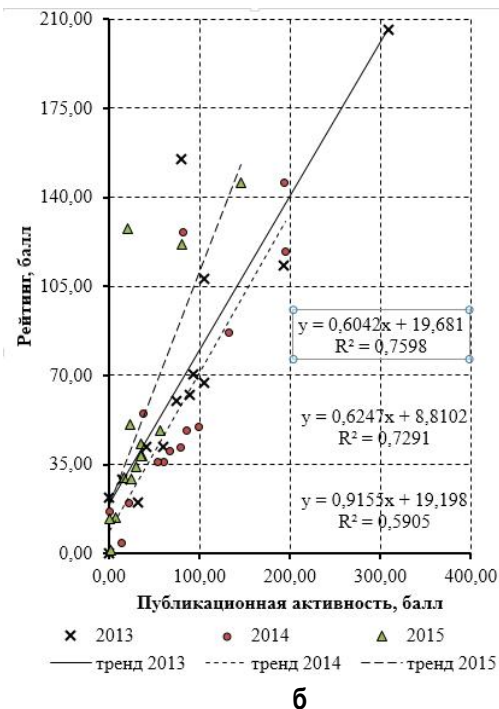
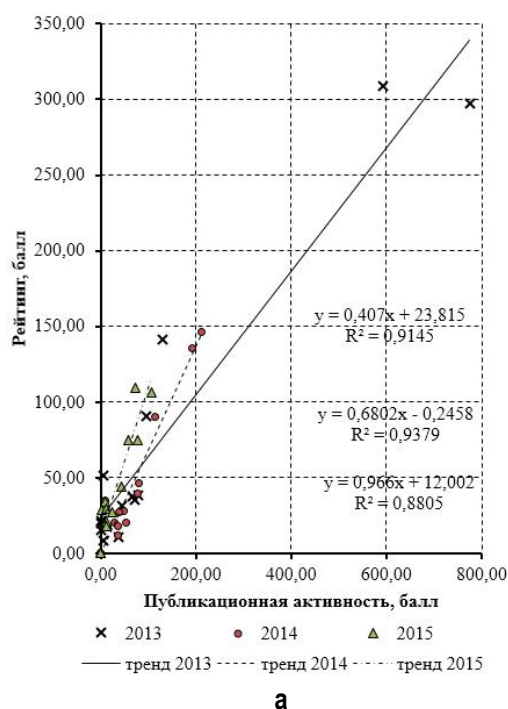


Рис. 9. Зависимость формирования рейтинга преподавателя от балла публикационной активности: а – для кафедр в списке лидеров 2015; б – для кафедр, не входящей в список ни в одном из периодов

4. Результаты анализа персональной публикационной активности профессорско-преподавательского состава университета

Особое внимание в анализе результатов оценки публикационной активности было уделено персональным показателям. На рис. 10 показана динамика позиций в общем рейтинге публикационной активности первых 20 научно-педагогических работников университета в 2013, 2014 и 2015 годах. Полученная диаграмма позволяет утверждать, что сформирована группа, которая инвариантна к изменению показателей публикационной активности, т.е. во все периоды работники присутствуют в группе топ 20. Состав этой группы невелик и составляет всего 6 человек. Однако большая часть группы вариативна и является чувствительной к изменению показателей и методики их расчета.

Кумулята доли публикационной активности по отдельным авторам, приведенная на рис. 11, продемонстрировала, что полное насыщение работ по публикационной активности (100% баллов) в 2013 году выполнили 60 % работников, в 2014 году – 86 % и в 2015 году – 91 %. Рост количества работников, включенных в активную публикационную деятельность, указывает на доступность достижения большей группы работников в 2015 году. Однако остается нерешенной проблема равномерного вовлечения коллектива в публикационную деятельность, а именно

50 % всех работ в 2013 году достигалось 6,9 % научно-педагогическими работниками, в 2014 году – 13,4 % и в 2015 году – 13,3 %.

На рис. 11 дополнительно обозначены символом: * – уровень полного насыщения работ; • – уровень выполнения 50 % работ по публикационной активности.

В ходе выполнения научно-исследовательских работ индивидуальные авторы образуют научные группы. Работа в таких группах позволяет принимать новые решения в разработке научно-технических проектах и фундаментальных исследованиях.

Образование крупных каллобараций способствует повышению публикационной активности университета. В ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» функционируют 23 научные школы. В каждой научной школе существует гибкий механизм привлечения к научной работе студентов, аспирантов, молодых ученых и ведущих научных исследований других организаций. Гибкое построение научных коллективов позволяет расширить тематику научных исследований. Образующиеся каллобарации увеличивают публикационную активность научных коллективов и всех ее участников. На рис. 12 показаны наиболее крупные каллобарации университета, которые в своем составе содержат руководителей научных школ университета, ведущих научно-педагогических работников, аспирантов, студентов и научных сотрудников внешних организаций.

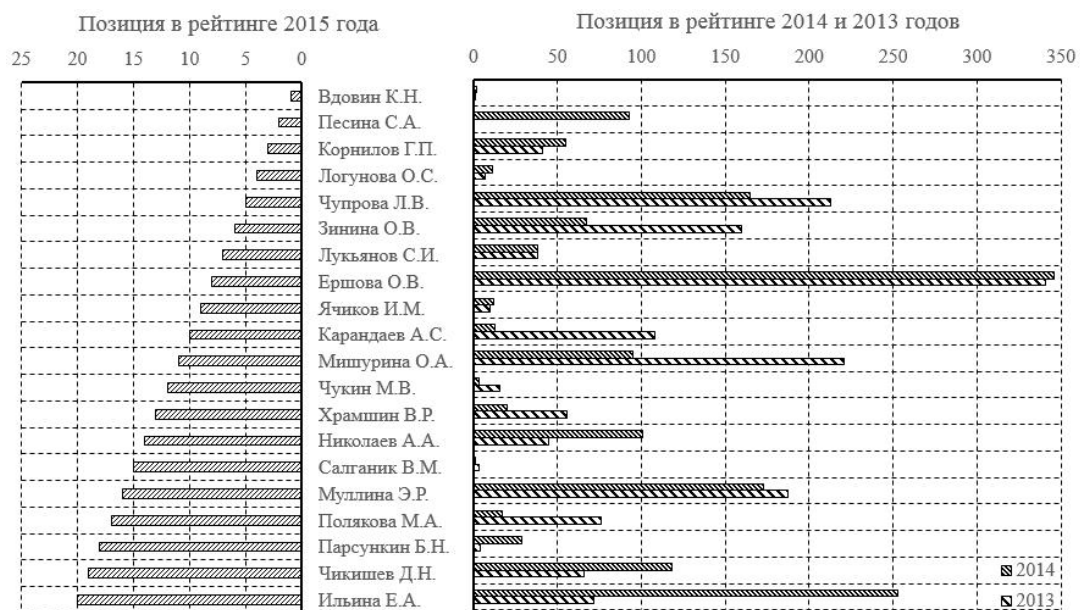


Рис. 10. Распределение персональной публикационной активности топ 20 научно-педагогических работников университета

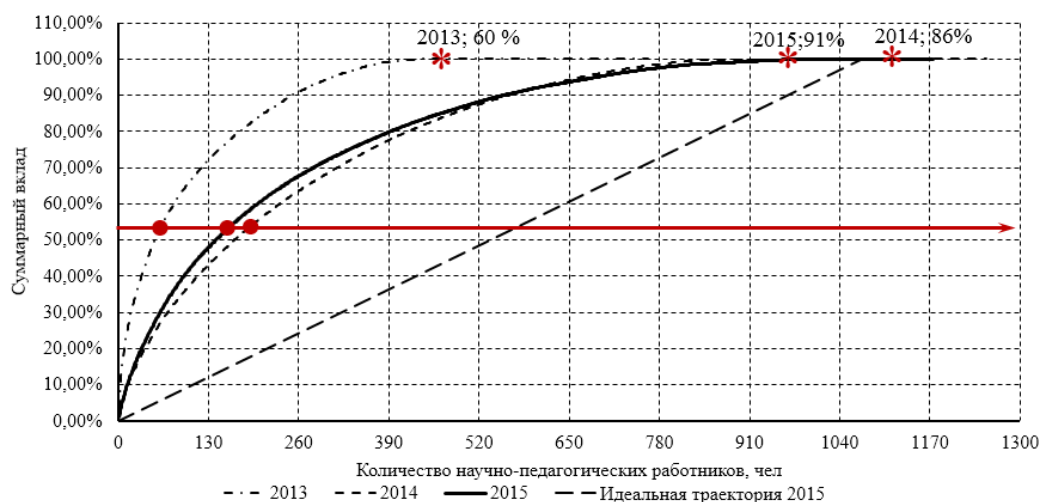


Рис. 11. Диаграмма выполнения работ по индивидуальной публикационной активности научно-педагогических работников университета

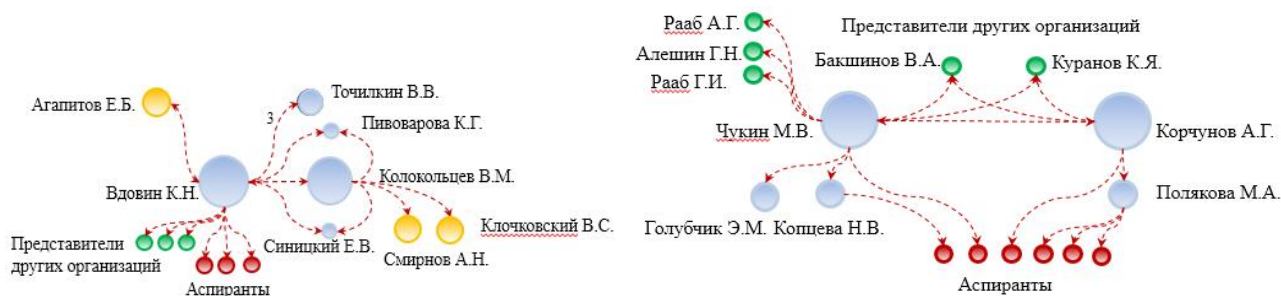


Рис. 12. Структура коллабораций научных школ: а – Развитие теории и технологий металлургического производства; б – Развитие теории и технологии инновационных процессов получения и обработки изделий из перспективных, композиционных и наноструктурных материалов

5. Отображение результатов публикационной активности авторов в показатели университета по данным аналитической наукометрической системы РИНЦ

Планомерные и систематические работы по управлению и анализу результатов публикационной активностью профессорско-преподавательского состава приводит к росту показателей университета в наукометрической системе РИНЦ. Эффективными управленческими решениями в области публикационной активности можно считать:

- развитие рейтинговой системы для оценки деятельности профессорско-преподавательского состава, на основе которой стимулируются результаты учебно-методической, научной и творческой деятельности работников;
- развитие системы стимулирования научно-педагогических работников за публикацию статей, индексируемых в наукометрических системах *Web of Science* и *Scopus*;
- открытие нового проекта о конкурсе статей для перевода за счет университета;

– совершенствование издательского проекта университета, в результате которого активизируется деятельность редакционных коллегий журналов и сборников, издающихся в ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет и. Г.И. Носова»;

– организационное построение системы регистрации и коррекции результатов публикационной активности в системе РИНЦ.

На рис. 13 и 14 приведены результаты отображения публикационной активности и стимулирующих мероприятий в системе РИНЦ.

На рис. 13 и 14 наблюдается возрастающая тенденция по трем основным показателям публикационной активности: количество цитирований публикаций (рост за период в 25,78 раз), количество публикаций (рост за период в 5,88 раза) и значение индекса Хирша организации (рост за период в 4,87 раза). Однако нельзя назвать положительной динамику роста процента самоцитирования работ, которая резко возросла в период с марта 2013 по апрель 2014 года и замедлила динамику роста в период с апреля 2014 по настоящее время.

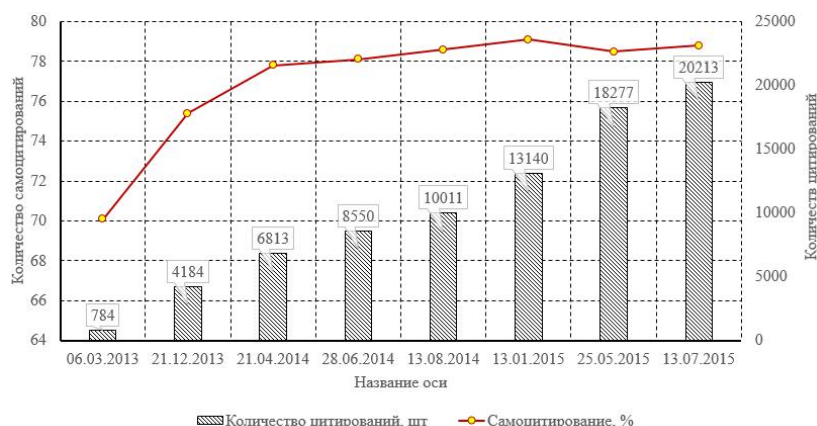


Рис. 13. Динамика показателей цитирования публикаций научно-педагогических работников в системе РИНЦ



Рис. 14. Динамика показателей количества публикаций и значений индекса Хирша научно-педагогических работников в системе РИНЦ

6. Достоинства и недостатки системы оценки публикационной активности профессорско-преподавательского состава университета

Трехлетний опыт эксплуатации рейтинговой системы с учетом показателей публикационной активности научно-педагогических работников позволил выявить ее достоинства и недостатки (табл. 2).

Таблица 2
Недостатки системы показателей публикационной активности и пути их устранения

Год	Достоинства системы	Недостатки системы
2013	1. Учет показателей, полученных за предыдущие плодотворные годы работы. 2. Учет статуса работ и журналов	1. Наличие ошибок ввода информации в ручном режиме. 2. Подсчет показателей без учета доли авторского участия в каждой статье.
2014	Усиление веса рецензируемых статей из перечня ВАК	3. Отсутствие резерва времени на достижение установленных показателей
2015	Использование показателей, характеризующих квалификацию работника за весь период работы и активность в текущем периоде	1. Не учитывается качество и вид опубликованных работ. 2. Отсутствие резерва времени на достижение установленных показателей

Учитывая недостатки системы, в июне 2015 года проведен опрос участников рейтинга о возможностях совершенствования структуры показателей и методики расчета рейтинга в части публикационной активности. После систематизации ответов выделено несколько фундаментальных предложений:

– введение внутренней структуры для двух показателей 2015 года:

а) ранжирование баллов для диапазонов значений индекса Хирша;

б) ранжирование баллов для значений индекса Хирша с учетом самоцитирования;

в) ранжирование баллов для различных типов публикаций;

– введение резерва времени для достижения установленных показателей.

Изменение структуры показателей возможно для ранжирования значений и вида индекса Хирша и не приводит к техническим сложностям в методике формирования данных. В связи с изменениями содержания списка журналов, в которых рекомендуется опубликование результатов научных исследований, ранжирование по виду публикаций пока не является рациональным.

На рис. 15 приведены укрупненные календарные графики, применяемые для расчета рейтинговых показателей публикационной активности. На рис. 15, а показан график учета и достижения показателей публикационной активности, который применялся в 2013 и 2014 годах. Согласно этому графику резервы времени не предусмотрены ни для одного из показателей. В итоге происходило только фиксирование значений без возможности управления и полной регистрации показателей. На рис. 15, б и в приведен график, применяемый в 2015 году. Для учета опубликованных статей в 2014 календарном году (см. рис. 15, б) введен резерв времени, который позволяет провести полную регистрацию статей, опубликованных в 2014 году, в системе РИНЦ.



Рис. 15. Укрупненные календарные графики проведения работ по учету показателей публикационной активности научно-педагогических работников: а – график, используемый в 2013 и 2014 годах; б – график, используемый в 2015 году для учета количества статей; в – график, используемый в 2015 году для учета значений индекса Хирша; г – предлагаемый календарный график с резервами времени на достижение и регистрацию утвержденных показателей

На рис. 15, в приведен график учета показателей публикационной активности, предусматривающий два резервных периода времени, первый из которых предназначен для подготовки материалов и достижения установленных показателей. Указанная схема позволяет не только фиксировать факт выполнения работ, но и провести эффективное управление процессом.

Заключение

Трехлетний опыт эксплуатации рейтинговой системы с использованием показателей публикационной активности показал, что:

1) при изменении состава показателей остаются инвариантными значения и соотношения для коллективов и отдельных научно-педагогических работников, ведущих активную научную деятельность и публикующих работы различного типа и статуса;

2) среди институтов и факультетов университета остаются наиболее активными институт металлургии, машиностроения и материалообработки и институт энергетики и автоматизированных систем;

3) результаты стимулирования публикационной активности научно-педагогических работников позволяет достигнуть существенного роста индикаторов университета в наукометрической системе РИНЦ;

4) существующая система учета показателей публикационной активности не является совершенной и требует пересмотра в части планирования работ по достижению установленных показателей;

5) изменения, введенные в показатели 2015 года, позволили расширить количество научно-педагогических работников до 91%, для которых доступно достижение показателей публикационной активности.

Список литературы

1. Колокольцев В.М., Разинкина Е.М. Университетский комплекс: интеграция и непрерывность // Высшее образование в России. 2011. № 5. С. 3–10.
2. Шестаков А.П. Инженерное образование является важнейшим фактором, от которого зависит наше будущее // Ректор вуза. 2014. № 12. С. 8.
3. Формирование показателей критериев для автоматизированного расчета и мониторинга рейтинга преподавателя в едином информационном пространстве кафедры / Куликов Г.Г., Конев К.А., Суворова В.А., Старцева Г.В. // Вестник УГАТУ. Управление, вычислительная техника и информатика, 2010. Т. 14. № 4(39). С. 175–184.
4. Кудрявцев П.П., Пятковский О.И. Расчет рейтинга преподавателей вуза с использованием гибридных экспертных систем // Известия Алтайского государственного университета. 2015. Т. 1. № 1 (85). С. 163–167.
5. Васильева Е.Ю., Граничина О.А., Трапцын С.Ю. Рейтинг преподавателей, факультетов и кафедр в вузе / Инновационная образовательная программа Герценовского университета. Учебно-методический комплекс. Санкт-Петербург, 2007.
6. Буйницкая О.П., Грицеляк Б.И. Институционный репозиторий как средство повышения научного рейтинга преподавателя // Образовательные технологии и общество. 2014. Т. 17. № 1. С. 408–416.
7. Логунова О.С., Леднов А.В., Королева В.В. Результаты анализа публикационной активности профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 3 (47). С. 78–87.
8. Логунова О.С., Арефьева Д.Я. Наукометрические показатели в деятельности ученого // Ab ovo ... (С самого начала ...). 2014. С. 102–103.
9. Шестаков В.П., Шестаков Н.В. ЭТОС, рейтинг вуза и публикационная активность преподавателя вуза // Высшее образование в России. 2012. № 3. С. 29–40.
10. Шестакова Л.Г. Планирование показателей учебно-методического рейтинга преподавателя вуза // Nauka-Rastudent.ru. 2014. № 1 (01). С. 12.
11. Логунова О.С., Ильина Е.А., Арефьева Д.Я. Результаты индексного анализа управления публикационной активностью научно-педагогических работников вуза // Научные труды SWorld. 2015. Т. 5. № 1 (38). С. 32–38.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

A TREND IN INDEXES OF THE PUBLICATION ACTIVITY OF THE ACADEMIC STAFF AT NOSOV MAGNITOGORSK STATE TECHNICAL UNIVERSITY

Logunova Oksana Sergeevna – D.Sc. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Computer and Software Engineering, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: logunova66@mail.ru.

Egorova Lyudmila Gennadievna – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Koroleva Valentina Valerievna – Ph.D. (Pedagogy), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Abstract. The paper concentrates on the trend in indexes of the publication activity of the university academic staff for three years of operation of the rating system. The results are presented with changes in the

structure of indexes, particularly, the reduction of their quantity and separation of the funding of projects into publication of papers in journals, which are indexed in the Russian and foreign scientometric systems. The

results are evaluated in terms of large units of the university, such as institutes and faculties, every department and person. The paper shows the invariance of the final index of the publication activity in the general rating of the research teams and individual researchers who are involved in active scientific work. It is proved that by simplifying the system of indicators, the number of employees, who are capable to reach the established parameters, grows (up to 91%). The strengths and weaknesses of the existing evaluation system in every period of its operation are identified. It is proposed to correct a graphical schedule for recording and monitoring of the publication activity of the academic staff to take measures contributing to efficient management of the publication activity and achievement of a specified level of indexes. The results obtained demonstrate the need for development and improvement of the system of the publication activity of the university academic staff.

Keywords: Publication activity, evaluation of the teaching activity, Hirsch index, projects of the publication activity, trend in indexes.

References

1. Kolokoltsev V.M., Razinkina E.M. Universitetskii kompleks: integratsiya i nepreryvnost [A university complex: integration and continuity]. *Vysshee obrazovanie v Rossii* [Higher education in Russia]. 2011, no. 5, pp. 3-10.
2. Shestakov A.L. Inzhenernoe obrazovanie yavlyaetsya vazhneishim faktorom, ot kotorogo zavisit nashe budushchee [Engineering education is an important factor which influences our future]. *Rektor VUZa* [University rector]. 2014, no. 12, p. 8.
3. Kulikov G.G., Konev K.A., Suvorova V.A., Startseva G.V. Formirovanie pokazatelei kriteriev dlya avtomatizirovannogo rascheta i monitoringa reitinga prepodavatelya v edinom informatsionnom prostranstve kafedry [Development of criterion values for automated calculations and monitoring of teachers' rating in common information space of a department]. *Vestnik UGATU. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika* [Vestnik of USATU. Management, computer engineering and computer science]. 2010, vol.14, no. 4(39), pp. 175-184.
4. Kudryavtsev P.P., Pyatkovskii O.I. Raschet reitinga prepodavatelya vuza s ispolzovaniem gibridnykh ekspertnykh sistem [Calculation of university teachers' rating using hybrid expert systems]. *Izvestiya Altaiskogo gosudarstvennogo universiteta* [News of Altai State University]. 2015, vol.1, no.1 (85), pp. 163-167.
5. Vasileva E.Yu., Granichina O.A., Trapitsyn S.Yu. Reiting prepodavatelya, fakultetov i kafedr v vuze [Ratings of teachers, faculties, and departments at the university]. *Innovatsionnaya obrazovatel'naya programma Gertsenovskogo universiteta. Uchebno-metodicheskii kompleks* [An innovation educational programme of the Herzen University. A study pack]. St. Petersburg, 2007.
6. Buinitskaya O.P., Gritselyak B.I. Institutsionnyi repozitorii kak sredstvo povysheniya nauchnogo reitinga prepodavatelya [An institutional repository as a way to increase a teacher's scientific rating]. *Obrazovatelnye tekhnologii i obshchestvo* [Educational technologies and society]. 2014, vol. 17, no.1, pp. 408-416.
7. Logunova O.S., Lednov A.V., Koroleva V.V. Rezultaty analiza publikatsionnoi aktivnosti professorsko-prepodavatel'skogo sostava FGBOU VPO «Magnitogorskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet im. G.I. Nosova» [Analysis of the publication activity of the academic staff at FSBEI HPE Nosov Magnitogorsk State Technical University]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2014, no.3 (47), pp. 78-87.
8. Logunova O.S., Arefeva D.Ya. Naukometricheskie pokazateli v deyatel'nosti uchenogo [Scientometric indicators in a researcher's activity]. *Ab ovo ... (S samogo nachala ...)* [Ab ovo ... (From the very beginning)]. 2014, pp. 102-103.
9. Shestak V.P., Shestak N.V. Etos, reiting vuza i publikatsionnaya aktivnost prepodavatelya vuza [University ethos, ranking and professors' publishing activity]. *Vysshee obrazovanie v Rossii* [Higher education in Russia]. 2012, no.3, pp. 29-40.
10. Shestakova L.G. *Planirovanie pokazatelei uchebno-metodicheskogo reitinga prepodavatelya vuza* [Planning indicators of a teaching rating of a university teacher]. Nauka-Rastudent.ru, 2014, no.1 (01), p. 12.
11. Logunova O.S., Ilina E.A., Arefeva D.Ya. Rezultaty indeksnogo analiza upravleniya publikatsionnoi aktivnostyu nauchno-pedagogicheskikh rabotnikov vuza [Results of the index analysis of management of university teachers' publication activity]. *Nauchnye trudy SWorld* [SWorld research papers], 2015, vol. 5, no.1 (38), pp. 32-38.

Логунова О.С., Егорова Л.Г., Королева В.В. Динамика показателей публикационной активности профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №3. С. 101–112.

Logunova O.S., Egorova Ly.G., Koroleva V.V. A trend in indexes of the publication activity of the academic staff at Nosov Magnitogorsk State Technical University. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 3, pp. 101–112.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Алютин Дмитрий Михайлович – аспирант, ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», Челябинск, Россия.

Андреев Сергей Михайлович – канд. техн. наук, зав. кафедрой автоматизированных систем и управления, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

Антипанов Вадим Григорьевич – канд. техн. наук, г. Магнитогорск, Россия.

Ахметова Айгуль Ураловна – студентка, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: Lbp40032@yandex.ru.

Бабинцев Ярослав Витальевич – студент ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

Белокопытов Василий Иванович – канд. техн. наук, доц. кафедры «Обработка металлов давлением», ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия. Тел.: (391)294-23-28. E-mail: VBelokopytov@sfu-kras.ru.

Беляев Сергей Владимирович – д-р техн. наук, доц., зав. кафедрой «Литейное производство» Института цветных металлов и материаловедения, ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия. Тел.: 8(391) 213-36-21. E-mail: 244812@mail.ru.

Богданов Дмитрий Владимирович – аспирант кафедры «Обработка металлов давлением» Института цветных металлов и материаловедения, ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия.

Бодьян Любовь Анатольевна – канд. пед. наук, доц. кафедры химии, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: bodyan_n@mail.ru.

Бурдина Юлия Александровна – аспирант кафедры «Динамика и прочность машин», ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия. E-mail: dpm@pstu.ru.

Варламова Ирина Александровна – канд. пед. наук, доц. кафедры химии, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: Varlamova156@gmail.com.

Герасименко Татьяна Евгеньевна – канд. техн. наук, доц., ФГБОУ ВПО «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный

технологический университет)», Владикавказ, Россия. E-mail: gerasimenko_74@mail.ru.

Гиревая Ханифа Яншаевна – канд. техн. наук, доц. кафедры химии, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: hanifa70@list.ru.

Гиревой Тимур Андреевич – студент института энергетики и автоматизированных систем, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: hanifa70@list.ru.

Горохов Юрий Васильевич – д-р техн. наук, доц., проф. кафедры «Обработка металлов давлением» Института цветных металлов и материаловедения, ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия.

Губанов Иван Юрьевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Литейное производство» Института цветных металлов и материаловедения, ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия.

Дегодя Елена Юрьевна – канд. техн. наук, доц. кафедры обогащения полезных ископаемых, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: 8(3519) 29-85-55. E-mail: magtu_opi@mail.ru.

Егорова Людмила Геннадьевна – канд. техн. наук, доц. кафедры вычислительной техники и программирования, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

Жадинский Дмитрий Юрьевич – инженер, ООО «Электроремонт», Магнитогорск, Россия.

Жиркин Юрий Васильевич – канд. техн. наук, проф. кафедры проектирования и эксплуатации металлургических машин и оборудования, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: girkin@yandex.ru.

Зуева Татьяна Юрьевна – ст. преп. кафедры промышленной экологии и безопасности жизнедеятельности, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: (812)29-84-62. E-mail: eco_safe@magtu.ru.

Кайралапов Ерлан Токпаевич – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник ТОО «Инновация», 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. E-mail: nlkalugina@gmail.com.

Караулов Николай Геннадьевич – канд. техн. наук, доц. кафедры открытой разработки месторождений полезных ископаемых, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: n_karaulov@mail.ru.

Каримова Люция Монировна – канд. хим. наук, вед. науч. сотрудник ТОО «Инновация», Караганда, Казахстан. E-mail: lutsia.08@mail.ru.

Козырь Александр Валерьевич – канд. техн. наук, доц. кафедры горных машин и транспортно-технологических комплексов, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: (3519) 29-85-74. E-mail: kozyr_a@inbox.ru.

Колмогоров Герман Леонидович – д-р техн. наук, проф. кафедры «Динамика и прочность машин», ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия. E-mail: dpm@pstu.ru

Колокольцев Валерий Михайлович – д-р техн. наук, проф., ректор ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

Корнилов Владимир Леонидович – канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой «Технологии металлургического производства» АНО ДПО КЦПК «Персонал», Магнитогорск, Россия. E-mail: kadry@mmk.ru.

Королева Валентина Валерьевна – канд. пед. наук, доц. кафедры информатики и информационной безопасности, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

Коротецкая Валентина Александровна – ст. преп. кафедры математики, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

Костин Игорь Владимирович – аспирант кафедры «Литейное производство» Института цветных металлов и материаловедения, ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия.

Крохин Александр Юрьевич – руководитель проекта ООО «РУСАЛ ИТЦ», Красноярск, Россия.

Курмачев Юрий Федорович – канд. техн. наук, доцент кафедры высшей математики, ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия. E-mail: kurmach@mail.ru.

Кутлубаев Ильдар Мухаметович – д-р техн. наук, проф. кафедры горных машин и транспортно-технологических комплексов, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: (3519) 29-85-74. E-mail: ptmr74@mail.ru.

Лаев Константин Анатольевич – инженер, ОАО «Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности», Челябинск, Россия.

Логунова Оксана Сергеевна – д-р техн. наук, доц., зав. кафедрой вычислительной техники и программирования, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: logunova66@mail.ru.

Медяник Надежда Леонидовна – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой химии, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: medyanikmagnitka@mail.ru.

Мешков Евгений Иванович – д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВПО «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)», Владикавказ, Россия. E-mail: eimeshkov@gmail.com.

Парсункин Борис Николаевич – д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

Першин Геннадий Дальтонович – д-р техн. наук, проф. кафедры горных машин и транспортно-технологических комплексов, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: pshenichnaya_e@mail.ru.

Пожидаев Юрий Александрович – ассистент кафедры проектирования и эксплуатации металлургических машин и оборудования, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: yoragan74@mail.ru.

Попова Тамара Максимовна – магистр 1 курса кафедры горных машин и транспортно-технологических комплексов, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: (3519) 29-85-74. E-mail: t.m-popova@yandex.ru.

Пузик Екатерина Александровна – магистр, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: ekshalimova@mail.ru.

Пыталев Иван Алексеевич – канд. техн. наук, доц. кафедры открытой разработки месторождений полезных ископаемых, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: (3519) 29-85-56. E-mail: Vehicle@list.ru.

Пышминцев Игорь Юрьевич – д-р техн. наук, генеральный директор ОАО «Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности», Челябинск, Россия.

Савинов Александр Сергеевич – канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой теоретической механики и сопротивления материалов, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: 8 (3519) 29-85-18. E-mail: Savinov_nis@mail.ru.

Сибгатуллин Салават Камилович – д-р техн. наук, проф. кафедры металлургии черных металлов, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: 8(3519) 29-84-30. E-mail: 10skt@mail.ru.

Синицкий Евгений Валерьевич – канд. техн. наук, доц. кафедры литейного производства и материаловедения, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: 8 (3519) 29-85-30. E-mail: e-v-s@mail.ru.

Смирнов Михаил Анатольевич – д-р техн. наук, научный сотрудник лаборатории термической обработки, ОАО «Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности», Челябинск, Россия.

Соложенкин Петр Михайлович – д-р техн. наук, проф., институт проблем комплексного освоения недр Российской академии наук (ИПКОН РАН), гл. научный сотрудник ИПКОН РАН, заслуженный деятель науки РФ, академик АН Республики Таджикистан. E-mail: solozhenkin@mail.ru.

Столярова Марина Сергеевна – студентка ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: stolyarovsv1@rambler.ru.

Уляков Максим Сергеевич – канд. техн. наук, ст. преп. кафедры управления недвижимостью и инженерных систем, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: maxim-atlet@yandex.ru.

Филатов Александр Андреевич – д-р техн. наук, главный научный сотрудник ГНЦ «ВНИИМЕТМАШ», Москва, Россия. E-mail: smm93@list.ru.

Фролов Виктор Федорович – руководитель проекта ООО «РУСАЛ ИТЦ», Красноярск, Россия.

Харченко Александр Сергеевич – канд. техн. наук, доц. кафедры металлургии черных металлов, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: 8(3519) 29-84-30. E-mail: as.mgtu@mail.ru.

Храмков Евгений Владимирович – аспирант, ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», Челябинск, Россия. E-mail: hramkov@rosniti.ru.

Чернова Татьяна Вячеславовна – канд. техн. наук, доц. кафедры «Динамика и прочность машин», ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия. E-mail: dpm@pstu.ru.

Черчинцев Вячеслав Дмитриевич – д-р техн. наук, проф., Заслуженный работник высшей школы РФ, зав. кафедрой промышленной экологии и безопасности жизнедеятельности, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: (812)29-85-15. E-mail: eco_safe@magtu.ru.

Чибашвили Алевтина Викторовна – аспирант, ФГБОУ ВПО «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)», Владикавказ, Россия. E-mail: dikarka88@mail.ru.

Шавакулева Ольга Петровна – канд. техн. наук, доц. кафедры обогащения полезных ископаемых, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: 8(3519) 29-85-55. E-mail: magtu_opi@mail.ru.

Шемшурова Нина Георгиевна – канд. техн. наук, проф. кафедры «Обработка металлов давлением», ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: ybitut85@mail.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, полное название организации (ее официально принятый английский вариант), адрес электронной почты хотя бы одного из авторов.

1.3. Аннотация (100-250 слов). Включает гипотезу, цель, эксперименты и методы, основные результаты, применение результатов исследования в промышленности (излагается в прошедшем времени).

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 – 14 пт, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический;
- при вставке **формул** использовать встроенный редактор формул **Microsoft Equation** со стандартными установками, применяется только сквозная нумерация;
- **рисунки и фотографии**, вставленные в документ, должны быть четко выполнены, допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров (толщины линий и размеры обозначений должны обеспечивать четкость при уменьшении рисунка до рациональных размеров), в форматах *.TIF, *.JPG, с разрешением **не менее 300 dpi**, B&W – для черно-белых иллюстраций, Grayscale – для полутонов. Максимальный размер рисунка с подписью – 150×235 мм. В тексте статьи должны быть подрисуночные подписи в местах размещения рисунков. Например:

Рис. 4. Расчётная зависимость $\gamma(t) = I_{nt}/I_{no}$ от времени и удалённости КЗ от выводов асинхронного двигателя

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

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

4. ДОКУМЕНТЫ, ПРИЛАГАЕМЫЕ К СТАТЬЕ

4.1. Рецензия.

4.2. Экспертное заключение о возможности опубликования.

4.3. 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, Редколлегия журнала «Вестник МГТУ» М.В. Чукину.

Телефоны: (3519) 29-85-26, 22-14-93.

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