

ВЕСТНИК

Магнитогорского государственного
технического университета им. Г. И. Носова

№1 (49) март 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:

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

Члены редсовета:

А.В. Дуб – ген. директор ОАО НПО

«ЦНИИТМАШ», д-р техн. наук;

Д.Р. Каплунов – член-кор. РАН, проф. ИПКОН
РАН, д-р техн. наук;

В.Ф. Рашиников – Председатель совета директоров
ОАО «ММК», проф., д-р техн. наук;

В.М. Счастливцев – зав. лабораторией ИФМ

УрО РАН; академик РАН, д-р техн. наук;

М. Пьетшик – профессор горно-металлургической
академии, г. Краков, Польша;

К. Мори – профессор Технологического
университета, г. Тойохаси, Япония;

И. Горлач – д-р наук в области машиностроения;
руководитель отделения мехатроники университета
им. Нельсона Манделы, Южная Африка;

Х. Дыя – проф., д-р техн. наук, директор
Института обработки металлов давлением
и инженерии безопасности, Ченстоховский
Технологический Университет, Польша;

А.Б. Найзабеков – академик, д-р техн. наук, проф.,
ректор Рудненского индустриального
института, Казахстан;

Р.О. Дюссан – профессор, Руководитель
факультета металлургических технологий
и наук о материалах, Технологический
институт, Мумбай, Индия;

М. Дабала – профессор, Факультет промыш-
ленного инжиниринга Университета г. Падуа,
Италия.

Главный редактор:

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

Первый зам. главного редактора:

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

Зам. главного редактора:

А.Г. Корчунов – проректор по международной
деятельности ФГБОУ ВПО «МГТУ», проф.,
д-р техн. наук.

Ответственные секретари:

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

М.В. Шубина – доц., канд. техн. наук
ФГБОУ ВПО «МГТУ».

Редактор: Н.В. Кутекина.

Технический редактор: К.В. Гаврусева.

Перевод на английский: О.Е. Сухих.

© 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:

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

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

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

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

16+, в соответствии с Федеральным законом №436-ФЗ от 29.12.10.

Адрес редакции:

455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38

Тел.: (3519) 22-14-93. Факс (3519) 23-57-60

URL: <http://www.vestnik.mgtu.ru>

E-mail: rio_mgtu@mail.ru; vestnik@mgtu.ru

Журнал подготовлен к печати издательским центром

МГТУ им. Г.И.Носова, 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38.

Отпечатан на полиграфическом участке МГТУ им. Г.И. Носова,

455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38.

Выход в свет 25.03.2015. Заказ 188. Тираж 500 экз. Цена свободная.

VESTNIK

of Nosov Magnitogorsk State Technical University

No. 1 (49) March 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:

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

Honorary Board Members:

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

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

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

V.M. Schastlivtsev – 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.

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

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

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

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

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

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

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

Editor-in-Chief:

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

First Deputy Editor-in-Chief:

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

Deputy Editor-in-Chief:

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

Executive Editors:

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

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

Editor: N.V. Kutekina.

Technical Editor: K.V. Gavrusseva.

Translated into English: O.E. Sukhikh

© 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: 25.03.2015. Order 188. Circulation: 500. Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

Разработка полезных ископаемых	5
<i>Тебиев Т.М., Джиоева А.К.</i> Оптимальная длина блока при разработке сложноструктурных крутопадающих тонких жил	5
<i>Василец В.Н., Лапаев В.Н., Пикалов В.А.</i> Проблемы повышения объемов и эффективности производства на разрезе «Заречный» в условиях открыто-подземной разработки	9
<i>Зиянгиров А.Р., Габдрахимов М.С.</i> Методика определения и контроля над измерениями параметров работы «пласт-скважина-оборудование»	16
<i>Панжин А.А.</i> Исследование геодинамических движений CORS для обоснования методики контроля процесса сдвижения на месторождениях Уральского региона	22
<i>Клочковский С.П., Смирнов А.Н., Савченко И.А.</i> Разработка физико-химических основ комплексного использования высокомагнетизальных сидеритов	26
Металлургия черных, цветных и редких металлов	32
<i>Смирнов Л.А., Шульмин Д.С., Смирнов А.Л., Дерябин Ю.А., Довголюк Л.В.</i> Внепечная дефосфорация низкоуглеродистого полупродукта при переделе ванадийсодержащего чугуна бесфлюсовым монопроцессом	32
Обработка металлов давлением	36
<i>Константинов Д.В., Корчунов А.Г.</i> Мультимасштабное компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением	36
<i>Ишимов А.С., Барышников М.П., Чукин М.В.</i> К вопросу выбора математической функции уравнения состояния для описания реологических свойств стали 20 в процессе горячей пластической деформации	43
<i>Некит В.А., Платов С.И., Курбаков И.А., Голев А.Д.</i> Экспериментальное исследование опережения и отставания при прокатке	52
<i>Карманов В.В., Трофимов В.Н., Нуртдинов А.С., Звонов С.Н.</i> Опыт применения роботизированного комплекса XSTRESS для измерения технологических остаточных напряжений	55
Материаловедение и термическая обработка материалов.....	60
<i>Вяткин Г.П., Морозов С.И.</i> Реконструкция поверхности (111) никеля в сплавах $Ni_{20-x}Mn_x$	60
<i>Копцева Н.В., Ефимова Ю.Ю., Чукин Д.М., Голубчик Э.М., Дабала М.</i> Микрорентгеноспектральный анализ неметаллических включений в высокопрочных инварных сплавах, полученных при использовании различных вариантов раскисления	65

CONTENTS

Mining	5
<i>Teziev T.M., Dzhioeva A.K.</i> The optimal block length when developing compound nar-row pitching veins	5
<i>Vasilets V.N., Lapaev V.N., Pikalov V.A.</i> Problems of increasing the volume and efficiency of production in the zarechny open-pit mine in terms of open-underground mining	9
<i>Ziyangirov A.R., Gabdrakhimov M.S.</i> Methods used to determine and control measurement of oper-ating parameters «formation-borehole-equipment»	16
<i>Panzhin A.A.</i> Study of CORS geodynamic movements to substantiate control methods of the displacement process in deposits of the Ural region.....	22
<i>Klochkovskiy S.P., Smirnov A.N., Savchenko I.A.</i> Development of physico-chemical bases of an overall use of high-magnesia siderites.....	26
Metallurgy of Ferrous, Non-Ferrous and Rare Metals	32
<i>Smirnov L.A., Shulmin D.S., Smirnov A.L., Deryabin Yu.A., Dovgolyuk L.V.</i> Ladle dephosphorization of low-carbon steel semi-product during the processing of iron containing vanadium by a fluxless monoprocess	32
Metal Forming.....	36
<i>Konstantinov D.Vy., Korchunov A.G.</i> Multi-scale computer simulation of metal forming processes.....	36
<i>Ishimov A.S., Baryshnikov M.P., Chukin M.V.</i> On the selection of a mathematical function of the equation of state for a description of rheological properties of steel 20 during hot plastic deformation.....	43
<i>Nekit V.A., Platov S.I., Kurbakov I.A., Golev A.D.</i> Experimental study of forward and backward slip during sheet rolling.....	52
<i>Karmanov V.V., Trofimov V.N., Nurtadinov A.S., Zvonov S.N.</i> Experience in application of the XSTRESS robot system to measure technological residual stresses й.....	55
Materials Science and Metal heat Treatment	60
<i>Viatkin G.P., Morozov S.I.</i> Reconstruction of Ni (111) surface of $Ni_{20-X}MnX$ alloys.....	60
<i>Koptseva N.V., Golubchik E.M., Efimova Yu.Yu., Chukin D.M., Dabala M.</i> Electron microprobe analysis of nonmetallic inclusions in high-strength invar alloys obtained using various embodiments of deoxidization.....	65

Стандартизация, сертификация и управление качеством	70
<i>Рубин Г.Ш., Полякова М.А., Гун Г.С.</i>	
Моделирование технологического трансформирования на основе S-образных кривых развития	70
Моделирование металлургических процессов	76
<i>Ячиков И.М., Портнова И.В.</i> Поведение магнитного поля в ванне дуговой печи постоянного тока при разной конструкции токоподводящей шины к подовому электроду	
	76
Надежность и долговечность металлургического оборудования	82
<i>Бурнашев Р.Э., Рябчиков М.Ю., Гребенникова В.В., Рябчикова Е.С.</i>	
Изучение возможных подходов к управлению дробилками центробежного типа производства ЗАО «Урал-Омега» с учетом качества получаемого продукта	82
Энергетика металлургии, энергосбережение и электротехнические комплексы	90
<i>Бушув А.Н., Картавец С.В., Кулагин А.Ю.</i>	
Техническая оценка внедрения автономного энергообеспечения электросталеплавильного производства в ОАО «Уральская Сталь»	90
<i>Хохлов Ю.И., Сафонов В.И., Лозингер П.В.</i>	
Внешние и энергетические характеристики компенсированных выпрямителей с векторным управлением	95
Теплоэнергетика металлургической отрасли	101
<i>Видин Ю.В., Казаков Р.В.</i> Расчет изменения температуры радиального ребра при лучистом теплоотводе с его поверхности	
	101
Строительные материалы и строительные технологии	105
<i>Корнилов С.Н., Абдукамилов Ш.Ш.</i> Результаты экспериментального изучения прочностных характеристик барханных песков, слагающих железнодорожное земляное полотно	
	105
Управление, автоматизация и информационные технологии в металлургии	111
<i>Сафонов Д.С., Логунова О.С.</i>	
Автоматизация проектирования конструкции секций вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок	111
Экономика, управление и рынок продукции	128
<i>Алферова А.В.</i>	
Влияние налоговых факторов на оценку стоимости металлургических предприятий	128
Сведения об авторах	132

Standardization, Certification and Quality Management	70
<i>Rubin G.Sh., Polyakova M.A., Gun G.S.</i>	
Modeling of the technological transformation based on S-shape curves of development	70
Simulation of Metallurgical Processes	76
<i>Yachikov I.M., Portnova I.V.</i> Behavior of a magnetic field in a bath of a dc arc furnace with different designs of a supply rail to a bottom electrode	
	76
Reliability and Service Life of Metallurgical Equipment	82
<i>Burnashev R.E., Ryabchikov M.Yu., Grebennikova V.V., Ryabchikova E.S.</i>	
The study of probable approaches to controlling the centrifugal-type crushers manufactured by Ural-omega CJSC factoring in the product quality	82
Power Engineering in Metallurgy, Energy Saving and Electrical Complexes	90
<i>Bushuev A.N., Kartavtsev S.V., Kulagin A.Yu.</i>	
Technical evaluation of independent power supply of electric furnace steelmaking implemented at OJSC Ural Steel	90
<i>Khokhlov Yu.I., Safonov V.I., Lonzinger P.V.</i>	
Output and power performance of compensated rectifiers with vector control	95
Heat Power Engineering in the Metallurgical Industry	101
<i>Vidin Yu.V., Kazakov R.V.</i> Calculation of temperature changes of a radial rib in case of radiant heat removing from its surface	
	101
Construction Materials and Construction Technologies	105
<i>Kornilov S.N., Abdukamilov Sh.Sh.</i> The results of an experimental study of the strength characteristics of barchan sands that form the railway subgrade	
	105
Management, Automation and Informational Technologies in Metallurgy	111
<i>Safonov D.S., Logunova O.S.</i>	
Automation of the design of secondary cooling sections of the continuous casting machine	111
Economics, Management and a Market of Products	128
<i>Alferova A.V.</i>	
The impact of tax factors on a valuation of metallurgical enterprises	128
Information about authors	132

РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.34

ОПТИМАЛЬНАЯ ДЛИНА БЛОКА ПРИ РАЗРАБОТКЕ СЛОЖНОСТРУКТУРНЫХ КРУТОПАДАЮЩИХ ТОНКИХ ЖИЛ

Тезиев Т.М., Джигоева А.К.

Северо-Кавказский горно-металлургический институт, г. Владикавказ, Россия

Аннотация. В работе определяется степень влияния длины блока на технико-экономические показатели работы при системах с магазинированием руды в зависимости от конкретных горно-геологических условий. Приводится методика установления оптимальной длины блока при разработке сложноструктурных крутопадающих тонких жил.

Ключевые слова: разработка рудных месторождений, оптимальная длина блока.

Введение

В настоящее время в России и странах СНГ наблюдается тенденция увеличения объемов добычи цветных и редких металлов. И уже в ближайшем будущем предусматривается значительный рост объемов добычи при одновременном снижении количественных и качественных потерь полезных ископаемых в недрах.

Эта проблема особенно актуальна для горных предприятий цветной металлургии, разрабатывающих маломощные крутопадающие месторождения, доленое участие которых в общем балансе добычи металлов значительно.

Качественные и количественные показатели этих предприятий в решающей степени зависят от параметров систем разработки. Однако в проектах и планах горных работ практически отсутствует экономическое обоснование. За основу обычно принимаются средние расчетные величины выемочной мощности, длины и высоты блока, без учета конкретных горно-геологических особенностей месторождения. В результате чего эффективность применяемой технологии резко снижается.

Методика исследования

Как правило, разработка крутопадающих месторождений производится с разбивкой шахтного поля на этажи и блоки. Параметры блоков бывают самыми различными. На отечественных рудниках в зависимости от степени механизации и интенсивности обработки длина блоков на жильных месторождениях в среднем составляет 40–60 м.

Однако на многих месторождениях по мере понижения горных работ и изменения горно-

геологических условий наблюдается постоянное изменение параметров блоков.

Анализ мировой практики дает разноречивые ответы на рациональность применения тех или иных параметров блока. Поэтому в каждом конкретном случае оптимальная длина блока должна устанавливаться на основе минимума затрат на подготовительно-нарезные работы, на доставку руды, ущерба от потерь и разубоживания руды.

Параметры системы разработки тонких жил характеризуются размерами выемочных блоков: высотой, шириной, длиной, расстоянием между рудоспусками, высотой подэтажей, слоев уступов и другими конструктивными элементами. Основными параметрами систем разработки жильных месторождений является длина очистного блока, его ширина и высота.

На параметры очистных блоков при разработке тонких жил значительно влияет размер принятой ширины очистного пространства. На действующих рудниках высоту этажа принимают на основе практических данных и норм технологического проектирования. Длину блоков определяют экономическими расчетами. С увеличением выемочной мощности и объема отбиваемой из блока рудной массы некоторые технико-экономические показатели улучшаются (увеличивается производительность труда забойных рабочих, уменьшается расход материалов и снижается себестоимость добычи 1 м³ рудной массы), но в то же время другие показатели, наоборот, ухудшаются (растет разубоживание руды, снижается содержание в ней металла, увеличиваются затраты на транспорт и переработку, растет себестоимость единицы конечного продукта). Это же подтверждает и обзор научно-технической литературы [1–3, 6].

Принятыми критериями оценки параметров систем разработки [1–6] являются безопасность работ в блоке, интенсивность выемки блока, минимальные удельные расходы по подготовке и эксплуатации на 1 т руды, длина горных выработок на 1000 т отбитой руды.

Для тонкожилых месторождений критерий минимальных удельных расходов на подготовку и эксплуатацию блока на 1 т руды не приемлем, так как удельные затраты на 1 т руды находятся в зависимости от принятой выемочной мощности и не соответствуют удельным расходам на единицу балансовых запасов металла в блоке.

Анализ показал, что в условиях Холстинского рудника при системе с магазинированием руды суммарные удельные расходы на 1 т руды с увеличением ширины очистного пространства уменьшаются, а на 1 г металла возрастают (рис. 1, табл. 1).

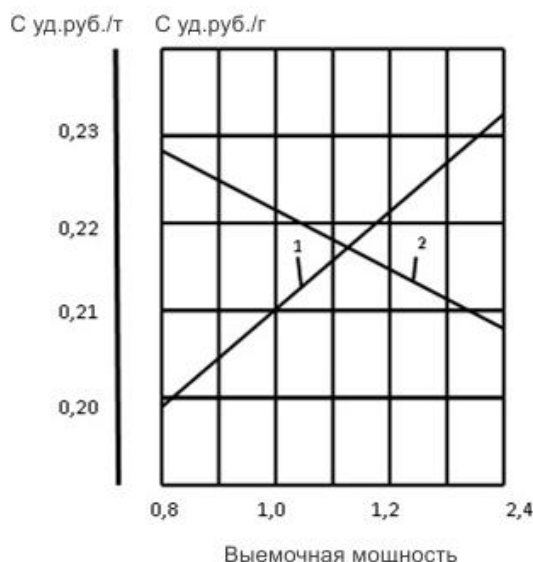


Рис. 1. Изменение удельных затрат на подготовку и эксплуатацию блока в зависимости от выемочной мощности: 1 – суммарные удельные расходы на 1 т руды; 2 – суммарные удельные расходы на 1 г металла

Таблица 1

Изменение удельных затрат на подготовку и эксплуатацию блока, в зависимости от выемочной мощности и содержания металла

Выемочная мощность, м	Удельные затраты на 1 т руды, руб./г	Удельные затраты на 1 г металла, руб./г
0,8	0,229	0,200
0,9	0,225	0,206
1,0	0,223	0,212
1,1	0,218	0,217
1,2	0,216	0,224
1,3	0,210	0,228
1,4	0,208	0,233

Применяемые экономические критерии оценки параметров систем разработки по минимальным удельным расходам на подготовку и эксплуатацию блока на 1 т руды [5], а также по равенству экономии на подготовке и приращению эксплуатационных расходов на 1 т руды, приходящиеся на заданное приращение длины блока [6], справедливы для разработки жил, мощность которых соответствует ширине очистного пространства или превышает ее.

Обзор литературы и анализ существующих методик показывает, что для тонкожилых месторождений определение оптимальной длины блока наиболее целесообразно производить по методике [1,6], то есть из условия равенства экономии по подготовке блока и приращения эксплуатационных расходов на единицу балансовых запасов металла, приходящуюся на заданное приращение длины блока. Принятый критерий оценки оптимальной длины блока для тонкожилых месторождений дает более точные данные с уменьшенной областью экономически невыгоднейших значений [1].

Сущность методики заключается в следующем:

1. Определяем величину целесообразного приращения длины блока:

$$\Delta l_1 = \frac{l_{\min}}{n_{\text{бл}} - 1}, \quad (1)$$

где $L_{\min}$ – минимальная, принятая на руднике длина блока, м; $n_{\text{бл}}$ – число блоков, обеспечивающих годовую производительность рудника.

2. После определения приращения длины блока устанавливаем ряд величин длины блока, принимаемых для технико-экономического расчета:

$$L_1 = L_{\text{бл}} + \Delta l_1; \quad L_2 = L_{\text{бл}} + \Delta l_2; \quad L_3 = L_{\text{бл}} + \Delta l_3. \quad (2)$$

3. Определением убывающих и возрастающих удельных расходов находим величины экономии на подготовку $C_{\text{п}}$ и приращения эксплуатационных расходов $C_{\text{э}}$, отнесенных на единицу балансовых запасов добываемого металла, приходящихся на разность между длинами блоков L_1 и $L_{\text{бл}}$, L_2 и L_1 , L_3 и L_2 и т.д.

Убывающие удельные расходы, отнесенные к единице металла по проведению и оборудованию блоковых восстающих C_1 , по нарезным работам в междублоковых целиках C_2 , а также экономический ущерб от потерь металла в этих целиках C_3 при неминерализованных вмещающих породах определяются по формулам:

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{C_B}{L_{\text{бл}} * m_{\text{жс}} * \gamma_{\text{ж}} * C_6 * R_M}; \\ C_2 &= \frac{C_H}{L_{\text{бл}} * H * m_{\text{жс}} * \gamma_{\text{ж}} * C_6 * R_M}; \\ C_3 &= \frac{C_{\text{ц}}}{L_{\text{бл}} * H * m_{\text{жс}} * \gamma_{\text{ж}} * C_6 * R_M}, \end{aligned} \quad (3)$$

где C_B , C_H , $C_{\text{ц}}$ – затраты на проходку 1 м восстанавливающего, нарезные работы в междублоковых целиках и ущерб от потерь металла в этих целиках, руб.; $L_{\text{бл}}$ – длина блока, м; $\gamma_{\text{ж}}$ – плотность жильной массы, т/м³; C_6 – содержание металла в жильной массе, г/т; R_M – коэффициент извлечения металла при добыче (эксплуатационные потери); H – наклонная высота этажа, м; $m_{\text{жс}}$ – мощность жилы, м.

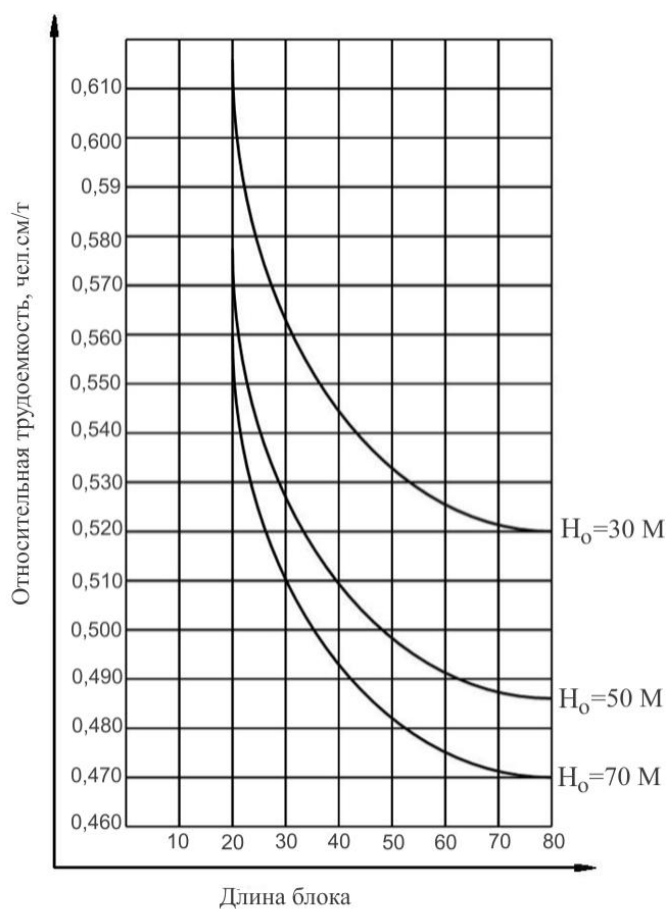
Возрастающие удельные расходы, отнесенные к единице металла на транспортирование руды C_4 , бурового оборудования C_5 , из-за падения давления сжатого воздуха в шлангах C_7 , определяют по формулам, руб./г:

$$\begin{aligned} C_4 &= \frac{C_p * L_{\text{бл}}}{2C}; \quad C_5 = \frac{0,005 * P * L_{\text{бл}}}{\rho_3 * C}; \\ C_6 &= \frac{2 * C_p * L_{\text{бл}}}{A}; \quad C_7 = \frac{0,0025 * P * L_{\text{бл}}}{\rho_3 * C}, \end{aligned} \quad (4)$$

где C_p – затраты на транспортирование руды на 1 м длины блока; P – тарифная ставка забойщика, руб./смену; C_p – затраты на ремонт и поддержание 1 м штрека в год/руб.; A – извлекаемые запасы металла в 1 т рудной массы, г; ρ_3 – производительность забойщика м/смену.

4. Содержание металла в 1 т рудной массы определяется из технической возможности минимальной выемочной мощности при неминерализованных вмещающих породах и выемочной массы из условия минимальной средневзвешенной себестоимости металла при минерализованных вмещающих породах [7].

Первоначально была рассчитана трудоемкость проведения работ в блоке в зависимости от ее длины при мощности жилы 0,4 м (рис. 2). Затем по приведенной выше методике была установлена оптимальная длина блока при содержании условного металла в руде $C_6 = 30$ г или 3% и $m_{\text{ж}} = 0,4$ м. Результаты расчета сведены в табл. 2.



1, 2, 3 – при высоте этажа соответственно 30, 50, 70 м

Рис. 2. Трудоемкость проведения работ в зависимости от длины блока

Таблица 2

Влияние длины блока на удельные затраты на 1 г металла при системе с магазинированием руды

Длина блока, м	Относительные удельные затраты на 1 г металла, %		
	Убывающие удельные расходы	Возрастающие удельные расходы	
		$B_2 = 2Z$	$B_3 = 1,19h$
20	290	35	20
40	250	75	42
60	145	125	75
80	98	165	105
100	95	250	140

Результаты расчетов показали:

а) в условиях Холстинского рудника при мощности жилы 0,4 м и содержании условного свинца в балансовых запасах 3% оптимальная длина блока составляет 62–68 м;

б) содержание металла в балансовых запасах не влияет на длину выемочного блока;

в) возрастающие и убывающие удельные расходы изменяются пропорционально изменению содержания металла в руде;

г) наибольшее влияние на длину блока оказывает мощность разрабатываемой жилы.

На рис. 3 показаны результаты расчета оптимальной длины блока для жил мощностью 0,4 м.

Методика расчета позволяет установить оптимальную длину блока при разработке тонких жил разной мощности с учетом изменения горно-геологических условий.

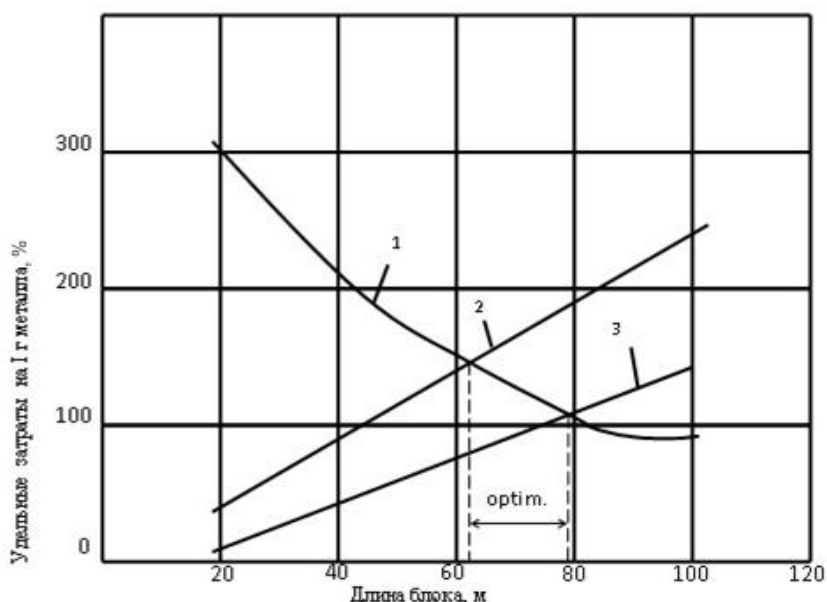


Рис. 3. Изменение удельных затрат на 1 г металла в зависимости от длины блока: 1 — убывающие удельные расходы, B_1 ; 2 — возрастающие удельные расходы соответственно при $B_2=2Z$; $B_3=1,19Z$

Выводы

1. Обзор научно-технической литературы показывает, что при разработке тонких жил длина блока варьируется в широких пределах (от 30 до 80–100 м).

2. При системе с магазинированием руды оптимальная длина блока должна устанавливаться на основе минимума затрат на подготовительно-нарезные работы, на доставку руды и ущерба от потерь разубоживания. По мере увеличения длины блока затраты на подготовительно-нарезные работы уменьшаются, растут затраты на доставку руды, потери и разубоживание руды.

3. Определение оптимальной длины блоков целесообразно производить из условия равенства экономии на подготовке блока и приращении эксплуатационных расходов на единицу балансовых запасов металла, находящихся на заданное приращение длины блока.

4. Наибольшее влияние на длину блока оказывает мощность разрабатываемой жилы. С увеличением выемочной мощности и объема отбиваемой из блока рудной массы суммарные затраты на 1 т руды уменьшаются, а на 1 г металла возрастают.

5. Содержание металла в балансовых запасах блока не влияет на его длину.

6. Оптимальная длина блока при разработке жил мощностью 0,4 м с содержанием условного металла в руде 3% колеблется в пределах 62–68 м.

7. Усовершенствованная методика расчета оптимальной длины блоков дает более точные

результаты, так как учитывает влияние затрат с изменением выемочной мощности на себестоимость конечного продукта горнорудного предприятия.

Список литературы

1. Агошков М.И., Симакон В.А., Чудаков В.В. Оптимальная ширина очистного пространства при разработке жильных месторождений // Цветметинформация. 1967. С. 3–8.
2. Кабисов Х.Г. Системы с магазинированием руды. Владикавказ, 1993. 120 с.
3. Шмидт А.И. Определение длины блока при разработке крутопадающих жил: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1969. 18 с.
4. Павловский Б.С., Цехин М.К. // Горный журнал. 1974. № 4. С. 33–35.
5. Тезиев Т.М., Соколова Е.И., Вазиева Л.Т. Повышение безопасности и эффективности разработки сложно-структурных месторождений // Материалы Международной научно-практической конференции «Развитие производственной и экологической

- безопасности в XXI веке. Проблемы и решения». «БЕЛЫЕ НОЧИ – 2009» 3-7 июня 2009 г., Санкт-Петербург. Владикавказ, 2009. С. 77–78.
6. Тезиев Т.М., Соколова Е.И. Технологии разработки сложноструктурных месторождений Джимидонского рудного поля // Приложение начертательной геометрии в геотехнологии: тез. докл. Всерос. конференции. Владикавказ, 2002. С. 101–102.
7. Тезиев Т.М. Совершенствование способов выпуска и погрузки обрушенной руды погрузочными ковшовыми машинами: дис. ... канд. техн. наук. Владикавказ, 2000. 160 с.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

THE OPTIMAL BLOCK LENGTH WHEN DEVELOPING COMPOUND NAR-RROW PITCHING VEINS

Teziev Taimuraz Muratovich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia. E-mail: tteziev@yandex.ru.

Dzhioeva Ada Konstantinovna – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia. E-mail: adadak@mail.ru.

Abstract. This paper sets influence of block length on technical and economic performance in systems with ore shrinkage depending on specific mining and geological conditions. It states the methodology for establishing the optimal block length when developing compound narrow pitching veins.

Keywords: development of ore deposits, optimal block length.

References

1. Agoshkov M.I., Simakov V.A., Chudakov V.V. Optimal width of a stoping zone when developing vein deposits. *Tsvetmetinformatsiya*, 1967, pp.3-8.
2. Kabisov Kh.G. *Sistemy s magazinirivaniem rudy* [Systems with ore shrinkage]. Vladikavkaz, 1993, 120 p.
3. Shmidt A.I. *Determining the block length when developing pitching veins*. Extended abstract of Ph.D. dissertation. Moscow, 1969, 18 p.
4. Pavlovsky B.S., Tsekhn M.K. *Mining journal*, 1974, no. 4, pp.33-35.
5. Teziev T.M., Sokolova E.I., Vazieva L.T. Improving safety and efficiency of the compound structure field development. Proceedings of the International scientific-practical conference "Development of industrial and environmental safety in the 21st century. Problems and solutions". "WHITE NIGHTS - 2009", June 3-7, 2009, St. Petersburg. Vladikavkaz, 2009, pp.77-78.
6. Teziev T.M., Sokolova E.I. Development of compound deposits of the Dzhimidonskiy ore field. Abstracts of the all-Russian conference. *Prilozhenie nachertatel'noj geometrii v geotekhnologii* [Application of descriptive geometry in geotechnology]. Vladikavkaz, 2002, pp.101-102.
7. Teziev T.M. *Improvement of broken ore drawing and loading by overhead loaders*. Ph.D. dissertation. Vladikavkaz, 2000, 160 p.

УДК 622.2

ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ ОБЪЕМОВ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА НА РАЗРЕЗЕ «ЗАРЕЧНЫЙ» В УСЛОВИЯХ ОТКРЫТО-ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКИ

Василец В.Н.¹, Лапаев В.Н.², Пикалов В.А.²¹ ОАО «Суэ-Кузбасс», г. Киселевск, Россия² ООО «НТЦ-Геотехнология», г. Челябинск, Россия

Аннотация. В статье приведен анализ вариантов развития горных работ на разрезе «Заречный» ОАО «СУЭК-Кузбасс». Особенность разреза – отсутствие свободных площадей и совместная открыто-подземная разработка. Определен эффективный и рациональный вариант развития горных работ.

Ключевые слова: разрез, эффективность, горно-геометрический анализ, открыто-подземная разработка.

Общие сведения о районе месторождения и разрезе «Заречный»

Разрез «Заречный» ОАО «СУЭК-Кузбасс» расположен на территории Прокопьевского района Кемеровской области в центральной части Ерунаковского геолого-промышленного района Кузбасса в пределах геологических участков Талдинские 1–2 Талдинского месторождения каменного угля.

Объем добычи угля разреза «Заречный» в 2011–13 годах составлял 3,0–3,3 млн т/год. Об-

ъем вскрышных пород в эти годы при текущем коэффициенте вскрыши 6,5–7,0 м³/т составлял 21,5–23,0 млн м³.

В настоящее время вскрышные породы транспортируются на Внешний отвал №1. Расстояние транспортирования составляет 2,8–3,0 км.

В районе высокая концентрация предприятий угольной промышленности. Так, разрез «Заречный» непосредственно граничит на севере и северо-западе с поверхностным комплексом шахты «Талдинская – Западная-2». Горные выработ-

ки этой шахты располагаются под полем разреза. В 0,5–1 км на север, северо-запад расположены участок открытых горных работ и подземных горных работ Талдинский Западный-1. К востоку от границы разреза проходит автомобильная технологическая дорога филиала ОАО «УК «Кузбассразрезуголь» «Талдинский угольный разрез» и межведомственная железная дорога.

Расположение разреза представлено на рис. 1.

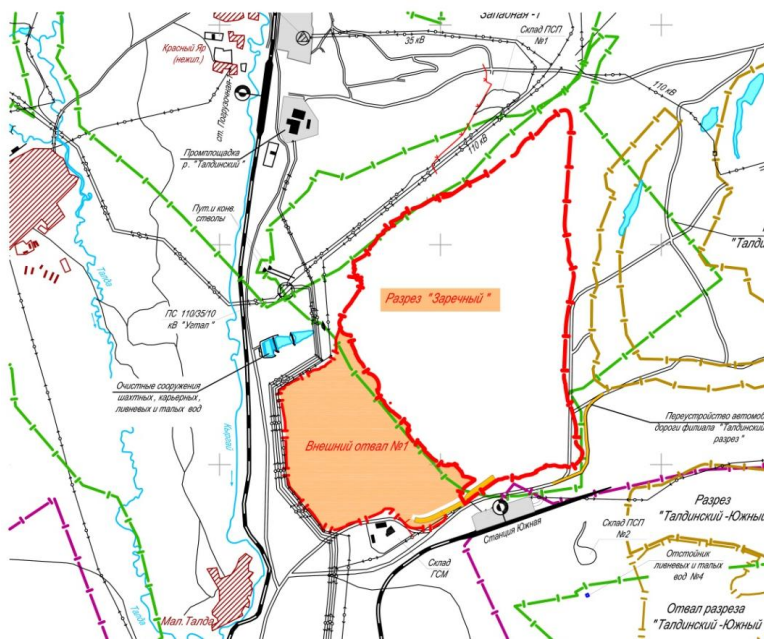


Рис. 1. Ситуационная схема расположения разреза «Заречный»

Поверхность участка представляет собой изрезанный логами водораздел рек Тагарыш и Кыргай. Ландшафт лесостепной. Долина р. Тагарыш, протекающей вдоль восточной границы, и долины крупных логов заболочены. В поймах рек и логов грунт, как правило, не промерзает.

Рельеф участка увалистый, абсолютные отметки водоразделов 330–370 м, долин 224–350 м. Вершины водоразделов к югу и юго-востоку имеют пологие склоны (7–12°), а к северу, западу и юго-западу – более крутые, преимущественно 15–20°, иногда 30–40°.

Таким образом, возможности внешнего отвалообразования ограничены недостатком площадей под застройку, наличием угленосных зон в местах возможного размещения отвалов, а также сложной инженерной ситуацией в районе, прилегающем к разрезу.

Проблемная ситуация

Руководством компании СУЭК перед разрезом поставлена цель: увеличение объемов добычи с 3,0 до 4,0 млн т год и повышение экономической эффективности деятельности [1].

Достижение поставленной цели в ситуации, сложившейся к настоящему времени, невозможно, так как:

1. В 2016 году закончатся свободные емкости Внешнего отвала №1, расстояния транспортирования на внешний отвал №2 возрастут в 2 раза и составят 5,5–6,0 км. Увеличение расстояния транспортирования повлечет за собой нерентабельную работу предприятия.

2. Под полем разреза расположены капитальные горные выработки шахты «Талдинская-Западная – 2». В связи с этим введены ограничения на ведение взрывных работ, что в свою очередь не позволяет увеличивать производительность выемочного оборудования.

Концепция выхода из проблемной ситуации:

1. Установить направления развития горных работ, обеспечивающие минимальные сроки начала внутреннего отвалообразования.

2. Определить эффективные параметры совместного ведения открытых и подземных работ [2].

Обоснование направления развития горных работ

Обоснование направлений развития горных работ, обеспечивающих минимальные сроки начала внутреннего отвалообразования, производилось с использованием горно-геометрического анализа, учитывающего требования обеспечения устойчивости функционирования, интенсивности [3,4] и безопасности отработки [5–7]. В дальнейшем производилась технико-экономическая оценка вариантов [8].

Для **скорейшего перехода на внутреннее отвалообразование**, с учетом существующих ограничений, были рассмотрены варианты развития горных работ (рис. 2): с севера на юг (вариант 1), с юга на север (вариант 2), с запада на восток (вариант 3).

Определено, что при развитии горных работ с Севера на Юг необходимо в кратчайшие сроки перенести промплощадку, что затруднительно из-за отсутствия мест для переноса. Кроме этого, отработка значительных объемов горелого угля («горельников») по 78 пласту требует специальных мероприятий для обеспечения безопасности ведения горных работ и устойчивости рабочего борта. Расстояние транспортирования вскрышных пород до Внешнего отвала №2 больше по сравнению с другими вариантами.

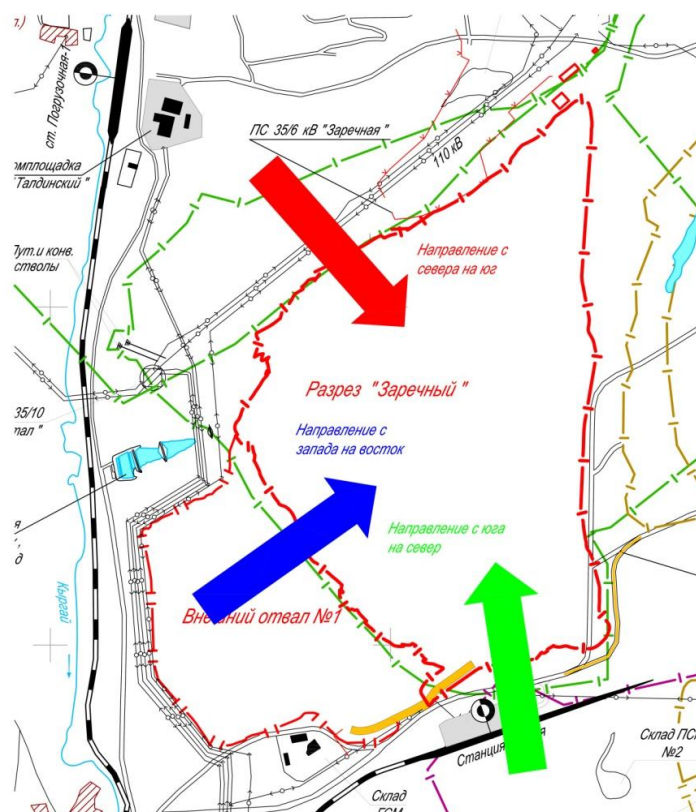


Рис. 2. Схема направлений развития

Вариант развития горных работ с Юга осложнен наличием навалов вскрышных пород и близостью действующих лав шахты Талдинская-Западная-2. Расстояние транспортирования вскрышных пород составит 2,8–5,8 км, что больше, чем по варианту «с запада на восток». В этом варианте наибольшая разница отметок дневной поверхности и почвы самого нижнего 73 пласта, что значительно увеличивает объем вскрышных работ.

Развитие горных работ с Запада на Восток имеет то преимущество, что при данном варианте нет необходимости переориентировать горные работы и уже имеется значительное выработанное пространство и, следовательно, возможен переход на внутреннее отвалообразование в короткие сроки. Разность высотных отметок между дневной поверхностью и почвой пласта 73 пласта минимальная, а также наименьшая мощность междупластья 73–78. Недостаток этого варианта в том, что часть запасов находится в зоне опасного влияния взрывных работ на подземные горные выработки. Это в свою очередь предопределяет оставление целика в ближайшие годы, а последующий внутренний отвал закроет доступ к этим запасам.

Для определения момента полного перехода на внутреннее отвалообразование по вариантам

2 и 3 было проведено календарное планирование горных работ [9]. Вариант 1 не рассматривался, так как был признан нереализуемым.

За шаг расчета взята 100-метровая панель-подвижка. Размеры панели приняты исходя из рациональной рабочей площади, обеспечивающей высокую производительность мощного выемочного оборудования. Для каждого варианта развития горных работ определялся объем вскрыши вывозимый во внешний отвал до момента перехода на внутреннее отвалообразование, расстояние транспортирования, а также произведена оценка целесообразности перехода на работу с крутыми бортами для ускорения создания внутренних отвальных емкостей [10]. Оценка произведена для углов рабочего борта 10, 15 и 20 град.

Результаты расчетов представлены в **таблице**.

Проведенный анализ показал, что по критерию минимального срока перехода на внутреннее отвалообразование наилучшим является направление развития горных работ с Запада на Восток. По этому варианту, при работе с углом рабочего борта 20 град, необходимо вывезти во внешний отвал 27566 тыс. м³ вскрышных пород и при этом будет сформирована емкость для размещения 31 млн м³ горной массы. Срок перехода на внутреннее отвалообразование – 2,1 года.

Сравнение вариантов развития горных работ

Наименование параметра	Ед. изм.	С запада на восток			С юга на север		
		Угол рабочего борта			Угол рабочего борта		
		10	15	20	10	15	20
Объемы вскрыши, перевозимые во внешний отвал (в целике)	тыс. м ³	53316,9	37535,8	27566,6	106790,3	87656,9	70249,3
Объемы добычи угля на период формирования внутреннего отвала	тыс. т	8616	6515	4914	20038	15839	12941
Коэффициент вскрыши за период формирования внутреннего отвала	м ³ /т	6,19	5,76	5,61	5,33	5,53	5,43
Емкость внутреннего отвала на момент пуска его в эксплуатацию	тыс. м ³	32449,1	32176,2	31072,2	29353,5	28591,2	26455,6
Срок перехода на внутреннее отвалообразование	год	3,2	2,6	2,1	6,2	4,9	4,1
Расстояние транспортирования вскрышных пород во внешний отвал №2	км	5,2			5,8		
Расстояние транспортирования вскрышных пород во внутренний отвал	км	2,5			2,8		
Расстояние транспортирования угля	км	3			3,6		

Особенности ведения горных работ по выбранному варианту

Развитие горных работ по выбранному варианту предполагает оставление части запасов в целике, размеры которого определялись исходя из безопасного влияния взрывных работ разреза на подземные выработки (рис. 3, 4) [7].

Место заложения разрезной траншеи, которое определено по критерию минимального коэффициента вскрыши на этапе подготовки внутреннего отвала, показано на рис. 5.

Порядком развития горных работ предусматривается провести разрезную траншею по 73 пласту в течение 3 кв. 2014 года. По мере отработки, по почве 73 пласта будет создаваться емкость под внутренний отвал, которая к концу 2015 года будет составлять 9600 тыс. м³.

После вскрытия 73 пласта горные работы развиваются на восток с целью создания необходимого фронта работ для отработки горной массы поперечными заходками в южном направлении, вдоль зацеличенных запасов. Это вызвано необходимостью создать фронт горных работ,

обеспечивающий добычу 4 млн т угля в год.

В 2016 году горные работы будут сосредоточены на отработке 73 пласта в южном и восточном направлениях. Такое развитие позволит осуществить ускоренную постановку южного борта в предельное положение и создать емкость под внутренний отвал объемом 17600 тыс. м³.

В 2017 году будет продолжаться развитие горных работ в юго-восточном направлении и постановка южного борта в предельное положение. В этом году начнется постановка в предельное положение части восточного борта, а затем развитие фронта горных работ в северо-восточном направлении. Емкость под внутренний отвал увеличится до 27600 тыс. м³.

В 2018 году по мере постановки восточного борта в предельное положение и углубления дна разреза подотвальная емкость увеличивается до 39900 тыс. м³.

В 2019 году планируется полностью перейти на внутреннее отвалообразование. Емкость внутреннего отвала составит 65000 тыс. м³ (рис. 6).

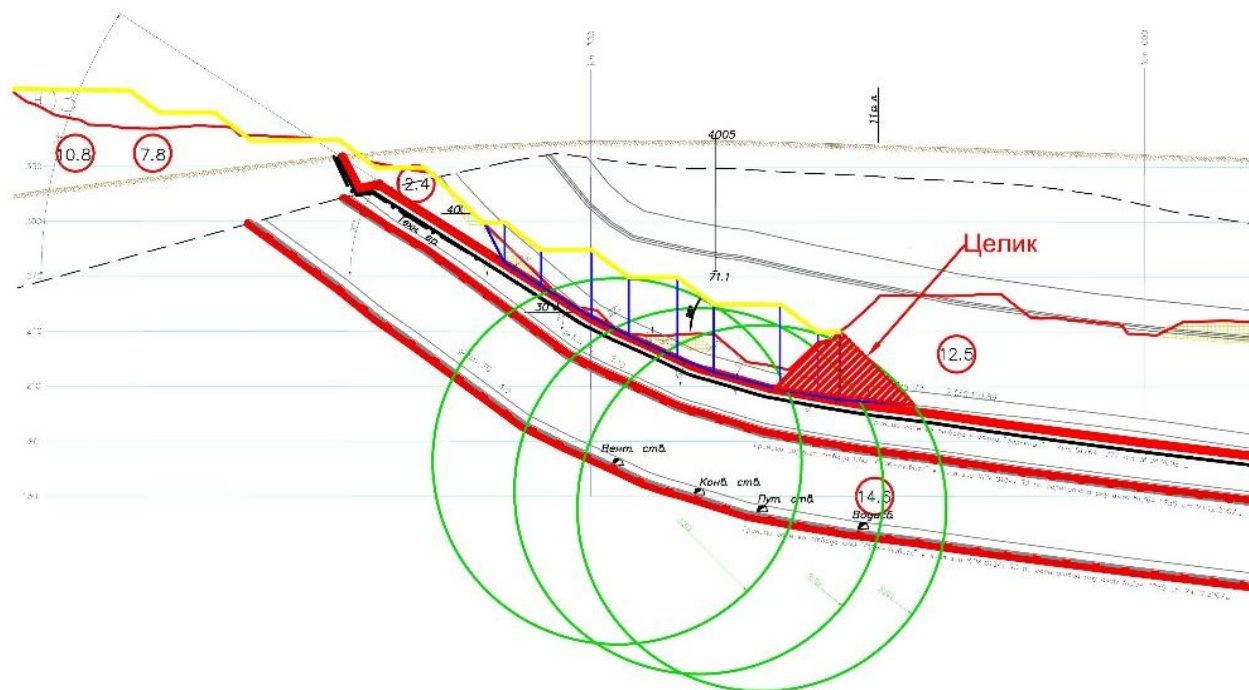


Рис. 3. Схема расчета безопасных расстояний для БВР



Рис. 4. Месторасположение целика для обеспечения безопасности подземных работ

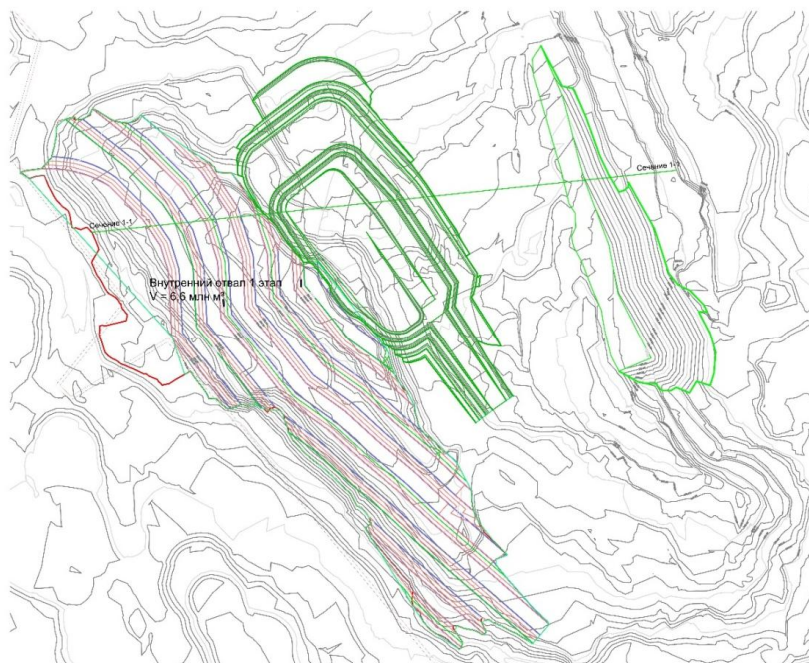


Рис. 5. Место заложения разрезной траншеи по 73 пласту

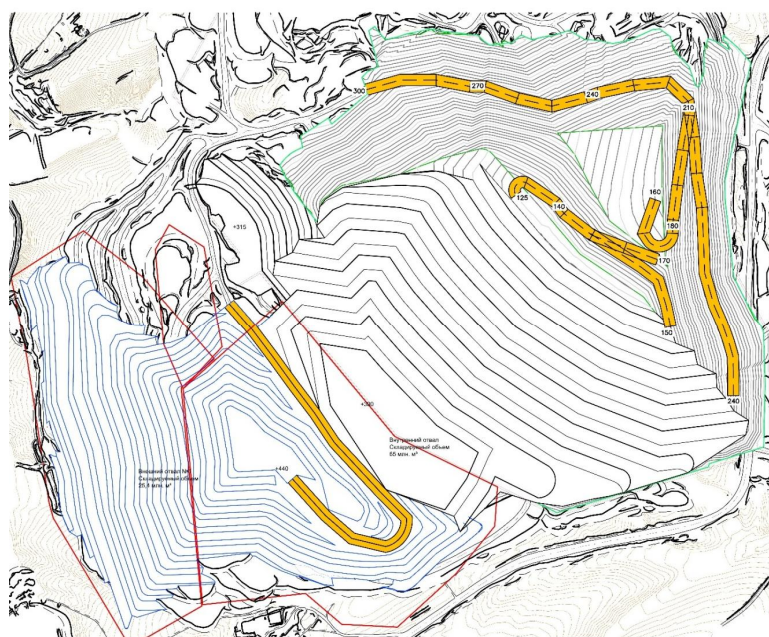


Рис. 6. Положение горных работ на 2019 год (5-год после начала изменений)

Выводы

Поиск путей повышения объемов и эффективности производства на разрезе «Заречный» позволил установить:

1. Наиболее предпочтительным является развитие горных работ с Запада на Восток. По этому варианту, при угле рабочего борта 20 град, срок формирования отвала – 2,1 года, за который будет сформирована емкость для размещения 31

млн м³ горной массы.

2. По выбранному варианту предусматривается ускоренная постановка бортов в предельное положение, для чего необходимо изменение направлений развития горных работ.

3. Влияние подземных работ приводит к необходимости оставления части запасов в целике, размеры которого определялись исходя из безопасного влияния взрывных работ разреза на подземные выработки.

Список литературы

1. Артемьев В.Б. Стратегия организационно-технологического развития угледобычи в ОАО «СУЭК» // Уголь. 2008, спецвыпуск. С. 11.
2. Каплунов Д.Р., Калмыков В.Н., Рыльникова М.В. Комбинированные геотехнологии. М.: Издательский дом «Руда и металлы», 2003. 560 с.:ил.
3. Обоснование выбора рационального направления развития горных работ на разрезе «Заречный» в условиях недостаточности площадей под отвалы / Канзычаков С.В., Василец В.Н., Лапаев В.Н., Савельев О.Ю., Соколовский А.В. // Угледобыча: технологии, безопасность, переработка и обогащение: Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня (научно-технического журнала). 2012. ОВ № 5. С. 98–105.
4. Канзычаков С.В., Лапаев В.Н., Соколовский А.В. Развитие горных работ на разрезе: методический подход к управлению // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. № 3. С. 73–76.
5. Инструкция о порядке утверждения мер охраны зданий, сооружений и природных объектов от вредного влияния горных разработок. РД 07-113-96* (утв. Постановлением Госгортехнадзора РФ от 28.03.1996 N 14) (ред. от 27.06.2002).
6. Постановление Госгортехнадзора России от 16.03.1998 N 13 «Об утверждении Правил охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях» (вместе с ПБ 07-269-98. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях).
7. Постановление Госгортехнадзора РФ от 30.12.1997 N 57 «Об утверждении Инструкции по безопасному ведению горных работ при комбинированной (совмещенной) разработке рудных и нерудных месторождений полезных ископаемых» (вместе с РД 06-174-97 Инструкция по безопасному ведению горных работ при комбинированной (совмещенной) разработке рудных и нерудных месторождений полезных ископаемых).
8. Астахов А.С., Краснянский Г.Л. Экономика и менеджмент горного производства: в 2 кн. М.: Изд-во АГН, 2002.
9. Гавришев С.Е. Организационно-технологические методы повышения надежности и эффективности работы карьеров: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2002. 231 с.
10. Бурмистров К.В. Обоснование методов управления интенсивностью отработки участков рабочей зоны карьера: дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск, 2005.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

PROBLEMS OF INCREASING THE VOLUME AND EFFICIENCY OF PRODUCTION IN THE ZARECHNY OPEN-PIT MINE IN TERMS OF OPEN-UNDERGROUND MINING

Vasilets Vladimir Nikolaevich – Chief Engineer, Open Pit Mine Administration, OJSC SUEK-Kuzbass, Kiselevsk, Russia. Phone: +7 (38464) 26420. E-mail: VasilezVN@suek.ru.

Lapaev Vasily Nikolaevich – Ph.D. (Eng.), Technical Consultant, STC-Geotechnology LLC, Chelyabinsk, Russia. E-mail: lapaev@ustup.ru.

Pikalov Vyacheslav Anatolievich – D.Sc. (Eng.), Head of the Department, STC-Geotechnology LLC, Chelyabinsk, Russia. E-mail: pikalov@ustup.ru.

Abstract. This article analyzes options of mining operations in the Zarechny open-pit mine of OJSC SUEK-Kuzbass. A feature of the open-pit mine is lack of free areas and open and underground combined mining. An efficient and reasonable option of development of mining operations is determined.

Keywords: open-pit mine, efficiency, mining and geometry analysis, open-underground combined mining.

References

1. Artemiev V.B. Strategiya organizatsionno-tekhnologicheskogo razvitiya ugledobychi v ОАО «SUEK» *Ugol* [Coal]. 2008, special issue, p.11.
2. Kaplunov D.R., Kalmykov V.N., Rylnikova M.V. *Kombinirovannye geotekhnologii* [Combined geotechnologies]. Moscow, 2003, 560 p.
3. Kanzychakov S.V., Vasilets V.N., Lapaev V.N., Savelev O.Yu., Sokolovsky A.V. Obosnovanie vyбора ratsionalnogo napravleniya razvitiya qornyykh rabot na razreze «Zarechny» v usloviyakh nedostatochnosti ploshchadey pod otvaly. *Ugledobycha: tekhnologii, bezopasnost', pererabotka i obogashhenie: Otdel'nyy vypusk Gornogo informacionno-analiticheskogo byulletenja (nauchno-tekhnicheskogo zhurnala)* [Coal production: technologies, safety, processing and beneficiation: a special issue of the Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and technical journal)]. Moscow, 2012, special issue no. 5, pp. 98-105.
4. Kanzychakov S.V., Lapaev V.N., Sokolovsky A.V. Development of mining in the open-pit mine: a technical approach to management. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2012, no. 3, pp. 73-76.
5. Instructions for a procedure of approving measures to protect buildings, facilities and natural sites against a hazardous effect of mining. RD 07-113-96 (Approved by Resolution of Gosgortekhnadzor of the Russian Federation #14 dated 28.03.1996) (as amended on 27.06.2002).
6. Resolution of Gosgortekhnadzor of the Russian Federation #13 dated 16.03.1998 "On approval of the Rules on protection of facilities and natural sites against a hazardous effect of underground mining in coal deposits" (together with PB 07-269-98. Rules on protection of facilities and natural sites against a hazardous effect of underground mining in coal deposits).
7. Resolution of Gosgortekhnadzor of the Russian Federation #57 dated 30.12.1997 "On approval of Instructions for safe mining in case of combined development of deposits of ore and nonmetallic mineral resources" (together with RD 06-174-97 Instructions for safe mining in case of combined development of deposits of ore and nonmetallic mineral resources).
8. Astakhov A.S. Krasnyansky G.L. *Economics and management of mining* [Ekonomika i menedzhment gornogo proizvodstva]. Moscow: AGN, 2002.
9. Gavrishev S.E. *Organizatsionno-tekhnologicheskie metody povysheniya nadezhnosti i effektivnosti raboty karerov: Monografiya* [Organizational and technological methods aimed to increase reliability and efficiency of pit operations: Monograph]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2002, 231 p.
10. Burmistrov K.V. *Obosnovanie metodov upravleniya intensivnostyu otrabotki uchastkov rabochey zony karera* [Rationale for methods to manage the intensity of mining in parts of work areas of pits Ph.D. dissertation]. Magnitogorsk, 2005.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ НАД ИЗМЕРЕНИЯМИ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ «ПЛАСТ-СКВАЖИНА-ОБОРУДОВАНИЕ»

Зиянгиров А.Р., Габдрахимов М.С.

Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия

Аннотация. Описанная методика позволяет определить значения искомых параметров, характеризующих работу системы «пласт-скважина-оборудование», только при измеренных значениях дебитов жидкости при эксплуатации скважины на различных режимах при неизвестных $K_{пр}$. Это особенно важно при установлении технологических режимов работы скважин, только вышедших из бурения, а особенно наклонно-направленных скважин, когда значения необходимых параметров невозможно определить непосредственным изменением, а определение их значений по положениям динамических уровней связано с большими погрешностями из-за фазного перераспределения газожидкостной смеси в стволе скважины.

В этих случаях для определения искомых параметров работы рассматриваемой системы линии приращения давлений строятся по указанной выше методике на любой бумаге, затем, перемещая ее по номограмме до совпадения с одной из кривых, находят значения искомых параметров.

Номограмма позволяет также по описанной выше методике по одному или нескольким значениям измеренных величин одного из параметров, характеризующих работу отдельного звена, определить значения других параметров, необходимых для установления оптимального режима работы системы «пласт-скважина-оборудование» в целом, например оборудования по коэффициенту подачи и т.д.

Приведенные значения скорости подъема жидкости по колонне скважины в номограмме позволяют определить время, необходимое для:

- получения приращения давления, достаточного для определения величин других параметров с удовлетворяющей решению поставленных задач точностью;
- для полного восстановления давления в скважине до пластового.

По найденным таким образом параметрам, характеризующим работу скважины, можно определить соответствующие им параметры работы пласта и наоборот, что облегчает решение задачи по установлению режима работы не только нефтеносного пласта в целом, но и параметров работы отдельных пропластков, составляющих этот нефтеносный пласт.

Ключевые слова: параметры, методика, номограмма, коэффициент, формула, давление, дебит, оборудование.

Введение

В настоящее время каждый параметр, характеризующий работу пласта, скважины и оборудования, определяется путем непосредственных измерений в основном без учета их взаимной зависимости. Это обстоятельство вносит существенные ошибки в значения параметров, для определения которых затрачиваются большие средства, и связано с большими потерями нефти из-за простоев скважин.

В данной работе параметры, характеризующие работу системы «пласт-скважина-оборудование», определяются непосредственно по номограмме, составленной для определённых заданных условий: диаметров эксплуатационной колонны, насосно-компрессорных труб, коэффициента продуктивности скважины, плотностей добываемых жидкостей и т.д.

Определение параметров работы «пласт-скважина-оборудование»

Основой программы являются кривые вос-

становления давления, составляемые для различных значений коэффициентов продуктивности при колебаниях пластовых давлений от максимума до минимума.

Кривые восстановления давлений получены путем графического интегрирования, изменением депрессии на пласт на одинаковые величины, начиная с нулевого значения до значения величины пластового давления. Интервалы накопления при этом задаются исходя из возможности определения искомых параметров как в малодобитных, так и в высокодобитных скважинах. С учетом этого здесь интервалы изменений давления взяты через 5 кгс/см^2 . Необходимые данные для составления кривых давлений находятся в следующей последовательности:

- определяется объем жидкости, поступающей в скважину при различных пластовых, забойных давлениях и коэффициентах продуктивности, по формуле

$$V' = (P_{пл} - P_{заб i}) \cdot \frac{K_{прод}}{24}; \quad (1)$$

– определяются приращения высоты жидкости в скважине по мере последовательного заполнения заданных объемов по формуле

$$H_g^i = \frac{P_{заб} \cdot 10}{\rho \cdot g}; \quad (2)$$

– определяется объем жидкости в заданном интервале ствола скважины при заданных диаметрах эксплуатационной колонны и колонны насосно-компрессорных труб

$$\Delta V_{з.к.}^H = \Delta h \cdot F_{з.к.} = \frac{\Delta P_{заб} \cdot 10}{\rho \cdot g} \cdot F_{з.к.}, \quad (3)$$

а также соответствующий объем, заданный в МПа, в межтрубном пространстве

$$\Delta V_{мтп}^H = \Delta h \cdot F_{мтп} = \frac{\Delta P_{з} \cdot 10}{\rho \cdot g} \cdot F_{мтп}, \quad (4)$$

где $\Delta P_{з}$ – заданная величина изменения забойного давления при накоплении жидкости; ρ – плотность жидкости, накапливаемой в заданном интервале ствола скважины; Δh – высота изменения уровня жидкости с известной плотностью с изменением забойного давления в скважине на заданную величину.

При этом время наполнения жидкостью заданного интервала скважины, соответствующее заданному приращению величины забойного давления для известных геологотехнических условий работы системы «пласт-скважина-оборудование», определяется по формуле:

– при накоплении жидкости в эксплуатационной колонне

$$t_{из.к.} = \frac{\Delta V_{з.к.}^H}{V_{из.к.}^{cp}} = \frac{\Delta P_{з} \cdot 10 \cdot F_{из.к.}}{\rho g \cdot V_{из.к.}^{cp}}, \quad (5)$$

– при накоплении жидкости в межтрубном пространстве скважины

$$t_{имтп} = \frac{\Delta V_{мтп}^H}{V_{имтп}^{cp}} = \frac{\Delta P_{з} \cdot 10 \cdot F_{имтп}}{\rho g \cdot V_{имтп}^{cp}}. \quad (6)$$

Указанным путем рассчитывается время накопления всех интервалов, на которые разбивается ствол скважины, жидкостью, поступающей из пласта, а также находится суммарное время, необходимое для восстановления давления от любого значения забойного давления до пластового по формуле

$$T = \sum t_{инак}. \quad (7)$$

Значения скорости подъема жидкости в различных интервалах скважины последовательно, как в эксплуатационной колонне, так и в межтрубном пространстве, определяется по формулам:

$$v_{з.к.} = \frac{\Delta V_{з.к.}}{F_{з.к.} \cdot t_{з.к.}}; \quad (8)$$

$$v_{мтп} = \frac{\Delta V_{мтп}}{F_{мтп} \cdot t_{мтп}}. \quad (9)$$

Объемные расходы жидкости при ее подъеме по стволу скважины:

– в эксплуатационной колонне

$$V_{з.к.}^P = \frac{\Delta V_{з.к.}}{t_{з.к.}}; \quad (10)$$

– в межтрубном пространстве

$$V_{мтп}^P = \frac{\Delta V_{мтп}}{t_{мтп}}. \quad (11)$$

По полученным данным составляется номограмма зависимости изменения различных параметров, характеризующих работу отдельных звеньев и в целом системы «пласт-скважина-оборудование».

Если кривые восстановления давлений, соответствующие одному коэффициенту продуктивности, проследивать от точки, соответствующей нулевой депрессии, до нулевого значения забойного давления, то кривые, соответствующие различным пластовым давлениям, совпадут. При этом для заданного пластового давления точка, соответствующая нулевому значению забойного давления, будет началом координат. Время отсчета восстановления давления начнется с этой нулевой точки. Тогда отрезок времени, отсеченный двумя ординатами, соответствующими началу координат и нулевому значению депрессии, соответствует значению времени, необходимого для полного восстановления забойного давления от нулевого его значения до пластового. Так как добыча увеличивается с увеличением депрессии, то линии зависимости дебита жидкости от депрессии, проведенные от нулевого значения депрессии и соответствующие заданным значениям коэффициентов продуктивности, будут индикаторными кривыми, соответствующими этим заданным значениям коэффициентов продуктивности.

Номограмма позволяет определить изменения всех основных параметров, характеризующих работу отдельных звеньев и всей системы «пласт-скважина-оборудование», только по значениям текущих суточных дебитов скважин. Для этого из точки, соответствующей текущему дебиту жидкости скважины, опускается перпенди-

куляр до пересечения с индикаторной линией, соответствующей коэффициенту продуктивности рассматриваемой скважины. Из точки пересечения проводится горизонтальная линия до пересечения с кривой восстановления давления с заданным коэффициентом продуктивности.

По обе стороны от точки пересечения на горизонтали отсекаются одинаковые отрезки, соответствующие одинаковым промежуткам времени. При этом точка, соответствующая меньшему значению забойного давления, берется как начальная, от которой начинается отсчет объема накопленной жидкости с дебитом, равным измеренному значению дебита жидкости скважины.

В конечной точке выделенного отрезка восстанавливается перпендикуляр, на котором откладывается в масштабе номограммы приращение давления столба жидкости, которая поступила бы в скважину при повышении величины забойного давления на среднюю величину приращенного давления, то есть

$$\Delta P_n = \frac{\Delta P_k}{2} = \frac{h_k \cdot \rho g}{2 \cdot 10} \quad (12)$$

Полученная конечная точка соединяется с начальной точкой на горизонтали линией, которая и будет соответствовать отрезку кривой фактического восстановления давления в данной скважине, по которой и определяются искомые параметры работы пласта и скважины.

Точность определения искомых параметров может быть повышена, если известны дебиты жидкости скважины при двух различных режимах ее работы. При этом искомые параметры работы скважины определяют путем непосредственного соединения двух точек, проведенных из точек пересечения перпендикуляров, опущенных из точек, соответствующих заданным значениям суточных дебитов, с индикаторной линией и с кривой восстановления давления.

Если коэффициент продуктивности скважины неизвестен, то он может быть определен по высоте столба жидкости в стволе скважины, на которую он поднимается за время, отсеченное по оси времени двумя перпендикулярами, опущенными из оси дебитов из точек, соответствующих измеренным суточным дебитам скважины, по формуле

$$\Delta h_{\text{зам}}^i = \frac{V_{\text{ж}}^{\text{ср}} \cdot t_{\text{зам}}}{F \cdot 24} \quad (13)$$

где $V_{\text{ж}}^{\text{ср}}$ – средний дебит жидкости, с которым она поступает при ее изменении между двумя измеренными значениями, то есть

$$V_{\text{ж}}^{\text{ср}} = V_2 + \frac{V_1 - V_2}{2} \quad (14)$$

При этом давление от накопленного столба жидкости может быть определено по формуле

$$\Delta P = \frac{\Delta h_{\text{зам}}^i \cdot \rho g}{10} \quad (15)$$

Среднее приращение давления, которое повлияло на изменение дебита при накоплении, будет

$$\Delta P_{\text{ср}} = \frac{\Delta P}{2} \quad (16)$$

По полученным приращениям дебитов жидкости и давления коэффициент продуктивности скважины может быть определен по формуле

$$K_{\text{пр}} = \frac{\Delta V_{\text{ж}}}{\Delta P_{\text{ст}}} = \frac{V_1 - V_2}{\Delta P_{\text{ср}}} \quad (17)$$

Тогда изменения депрессии на пласт при измеренных дебитах жидкости из скважины определяются:

$$\Delta P_1 = \frac{V_1}{K_{\text{пр}}} \quad (18)$$

$$\Delta P_2 = \frac{V_2}{K_{\text{пр}}} \quad (19)$$

По полученным значениям депрессии на диаграмме проводится линия зависимости дебитов жидкости от депрессии, то есть индикаторная линия скважины. Также определяется $K_{\text{пр}}$ при откачке вязких жидкостей.

Как видно, описанная методика позволяет определить значения искомых параметров, характеризующих работу системы «пласт-скважина-оборудование», только при измеренных значениях дебитов жидкости при эксплуатации скважины на различных режимах при неизвестных $K_{\text{пр}}$. Это особенно важно при установлении технологических режимов работы скважин, только вышедших из бурения, а особенно наклонно-направленных скважин, когда значения необходимых параметров невозможно определить непосредственным изменением, а определение их значений по положениям динамических уровней связано с большими погрешностями из-за фазного перераспределения газожидкостной смеси в стволе скважины.

В этих случаях для определения искомых параметров работы рассматриваемой системы линии приращения давлений строятся по указанной выше методике на любой бумаге, затем, перемещая ее по номограмме до совпадения с одной из кривых,

находятся значения искомых параметров.

Номограмма позволяет также по описанной выше методике по одному или нескольким значениям измеренных величин одного из параметров, характеризующих работу отдельного звена, определить значения других параметров, необходимых для установления оптимального режима работы системы «пласт-скважина-оборудование» в целом, например оборудования по коэффициенту подачи и т.д.

Приведенные значения скорости подъема жидкости по колонне скважины в номограмме позволяют определить время, необходимое для:

- получения приращения давления, достаточного для определения величин других параметров с удовлетворяющей решения поставленных задач точностью;

- для полного восстановления давления в скважине до пластового.

По найденным таким образом параметрам, характеризующим работу скважины, можно определить соответствующие им параметры работы пласта и наоборот, что облегчает решение задачи по установлению режима работы не только нефтеносного пласта в целом, но и параметров работы отдельных пропластков, составляющих этот нефтеносный пласт.

Эта задача значительно облегчается, если по скважине имеются данные определения коэффициентов проницаемости пород разреза нефтеносного пласта или же данные забойной дебитометрии, характеризующие работу отдельных пропластков. При наличии таких данных не трудно определить добычные возможности нефтеносного пласта и его отдельных пропластков и сравнить их с фактической добываемой продукцией. При этом теоретические добычные возможности пласта могут быть определены с учетом режима притока жидкости по формулам:

– при ламинарном режиме фильтрации

$$V_m^{\text{л}} = \frac{2\pi kh}{\mu} \cdot \frac{P_k - P_c}{\ln \frac{R_k}{r_c}}, \quad (20)$$

– при турбулентном режиме фильтрации

$$V_m^{\text{т}} = 2\pi kh \cdot \sqrt{r_c (P_k - P_c)}. \quad (21)$$

Тогда соответствующий теоретическому дебиту коэффициент продуктивности будет равен

$$K_{\text{пр}} = \frac{2\pi kh}{\ln \cdot \mu \cdot \frac{R_k}{r_c}}. \quad (22)$$

Фактический режим фильтрации определяется по измеренному дебиту, соответствующему стати-

ческому и динамическому уровням, или пластовому и забойному давлениям. Тогда из формулы

$$Q_{\phi} = K_{\text{пр}} (P_{\text{пл}} - P_{\text{заб}}) \quad (23)$$

$$K_{\text{пр}} = \frac{Q_{\phi}}{\Delta P} \quad (24)$$

Значение $K_{\text{пр}}$ может быть найдено с определенной погрешностью, также непосредственно по данным измерений изменений динамического уровня при накоплении по приведенной выше методике.

Имея данные о теоретическом и фактическом дебитах скважины, устанавливают степень использования добычных возможностей скважины:

$$n = \frac{Q_{\phi}}{Q_m} = \frac{K_{\text{пр}}^{\phi}}{K_{\text{пр}}^m} \quad (25)$$

или

$$K_{\text{пр}} = A \cdot K, \quad (26)$$

где K – коэффициент проницаемости.

При известной степени использования добычных возможностей скважины, если известны первоначальные коэффициенты проницаемости пропластков, исходя из известных мощностей, определяется по приведенным выше формулам притока количество возможного поступления жидкости из отдельных пропластков, начиная с более высокопроницаемых пропластков.

Результаты исследования скважин различными методами показывают на приближенное совпадение фактического объема фильтрации жидкости в более высокопроницаемые пласты, определенные по коэффициенту проницаемости.

Поэтому интервалы работающих пропластков могут быть определены по равенству фактически измеренного дебита с суммой теоретических дебитов отдельных пропластков, начиная с больших коэффициентов проницаемости.

Безусловно, более точно характер работы отдельных пропластков устанавливается по данным забойной дебитометрии.

Полученные указанными методами данные о полноте работы нефтеносного пласта и отдельных его пропластков позволяют наметить конкретные мероприятия по обработке пластов в призабойной зоне нефтяных скважин и более точно установить ожидаемый эффект от их приведения.

Приведенный способ значительно упрощает выбор рациональных геолого-технических мероприятий и определение их эффективности, так как в достижении последней является увеличе-

ние притока нефти к скважинам. Это достигается путем установления рациональных скоростей фильтрации пластовых жидкостей, особенно в призабойных зонах скважин, что на практике может быть достигнуто только путем регулирования скоростей фильтрации в отдельных пропластках, составляющих нефтеносный пласт, изменением их коэффициентов проницаемости.

Следовательно, знание значений коэффициентов пористости и проницаемости по пласту и по напластованию нефтеносного горизонта позволяет наметить проведение конкретных геолого-технических мероприятий с учетом литологическо-фациальных их изменений по пропласткам.

Очевидно, что истинная характеристика строения и состава пород, составляющих нефтеносный пласт и его пропластков, может быть получена по керновым материалам. Поэтому извлечение, обработка, хранение кернового материала позволяет получить наиболее полные данные не только о пористости и проницаемости слагающих пласт пород, но и цементного материала, скрепляющего его зерна, составе и свойствах веществ, покрывающих поверхности этих зерен (налетов, смолистых оболочек и др.).

Известно, что каждому значению коэффициента проницаемости при одинаковой депрессии, при сохранении постоянных значений других параметров, характеризующих работу нефтеносного пласта, соответствует определенный приток жидкости. Чем больше значения коэффициента проницаемости, тем с большей точностью определяется величина притока. Наиболее полную характеристику работы отдельных пропластков можно получить по данным скважинной дебитометрии. При этом по приращениям количества поступающей жидкости могут быть, с определенной точностью, установлены значения коэффициентов проницаемости отдельных пропластков и изменения их величин с изменением величин забойного и пластового давлений.

Таким образом, обработав результаты простейших исследований скважин, заключающихся только в измерении значений отдельных параметров (дебитов жидкости, величин статического и динамического уровней или отдельных значений забойного давления и т.д.), можно с достаточной точностью определить зависимость величины притока жидкости в скважину от геолого-физических условий ее движения в пласте и в призабойных зонах скважин.

Это позволяет с достаточной для практической работы точностью установить зоны притока жидкости с различными дебитами, определить коэффициенты продуктивности этих пропластков, то есть путем изменений режимов работы отдельных пропластков установить оптимальный режим работы пласта в целом, при котором обес-

печивается по всем пропласткам равномерное стягивание фронта движения воды к скважинам, а следовательно, и увеличить коэффициенты нефтеотдачи нефтеносных горизонтов.

Следовательно, коэффициенты продуктивности скважин, определенные по значениям коэффициентов проницаемости, позволяют более обосновано определить ожидаемые отборы жидкостей как при изменениях режимов работы в ходе эксплуатации скважин, так и при проведении геолого-технических мероприятий, направленных на увеличение коэффициентов проницаемости отдельных пропластков или полностью нефтеносного пласта.

Однако величина коэффициента продуктивности, определенная обычным способом на узком интервале изменения депрессии на пласт, удобна только для приближенного оперативного определения дебита скважины, а следовательно, и для контроля за установленным (заданным) режимом работы, как отдельных звеньев, так и в целом системы «пласт-скважина-оборудование». Между тем существующий способ определения коэффициента продуктивности не позволяет установить наиболее рациональный, или максимальный, или потенциальный режим работы системы «пласт-скважина-оборудование», который связан с изменением режима работы пласта, что в большинстве случаев производится путем проведения различных геолого-технических мероприятий, то есть он не позволяет прогнозировать изменение добычи нефти с необходимой точностью.

Выводы

Вопросы рационализации разработки нефтеносных залежей, основной целью которых является достижение максимальной конечной нефтеотдачи за оптимальные сроки, требуют регулирования отборов нефти по скважинам в широких диапазонах как в сторону увеличения, так и уменьшения отборов жидкостей из продуктивных пластов. Это, в свою очередь, требует для каждого момента времени и в перспективу, как указывалось выше, знаний потенциально возможных дебитов нефти (жидкости) из скважин, максимальных и оптимальных отборов нефти в текущие моменты разработки нефтеносных залежей, которые могут быть установлены только при оперативном учете всех изменений в нефтеносном пласте. Таким параметром остается коэффициент проницаемости пласта в различных зонах последнего: в зоне отбора нефти (в призабойной зоне скважины), в нефтеносном пласте и в зоне нагнетания (в призабойной зоне нагнетательных скважин), который может изменяться с изменением физико-геологических и технико-технологических условий разработки нефтеносной залежи.

Поэтому во всех случаях добычные возможности скважин, установление оптимальных режимов работы скважин и системы «пласт-скважина-оборудование» в целом должны обосновываться на величину коэффициента проницаемости.

Однако коэффициент продуктивности скважин как наиболее гибкий показатель, удобный для контроля и установления режимов работы оборудования и скважин, в пределах обеспечения их работы с необходимой точностью, по-видимому, и далее сохранится для оперативной работы при установлении оптимального режима работы нефтеносного пласта.

Список литературы

1. Адонин А.Н. Процессы глубинно-насосной нефтедобычи. М.: Недра, 1964. 264 с.
2. Тимашев А.Т., Зиякаев З.Н. К методике определения рентабельности эксплуатации скважин, нефтеносных залежей и разработки нефтяного месторождения // Нефть и газ: проблемы добычи нефти, транспорта, хранения и переработки: межвуз. сб. науч. тр. Уфа, 1998.
3. Пат. 2016235 Рос. Федерация. Установка скважинного штангового насоса / Тимашев А.Т. Заявл. 29.05.1991; опубл. 15.07.1994. 5 с.
4. Уразаков К.Р. Механизированная добыча нефти (сборник изобретений). Уфа: Нефтегазовое дело, 2010. 329 с.
5. Справочная книга по добыче нефти / под ред. Ш.К. Гиматудинова. М.: Недра. 1974. 267 с.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

METHODS USED TO DETERMINE AND CONTROL MEASUREMENT OF OPERATING PARAMETERS "FORMATION-BOREHOLE-EQUIPMENT"

Ziyangirov Artur Ramilevich – Postgraduate Student, Ufa State Petroleum Technological University, Russia. E-mail: ZiyangirovAR@gmail.com.

Gabdrakhimov Mavlitzyan Sagityanovich – D.Sc. (Eng.), Professor Ufa State Petroleum Technological University, a branch in the city of Oktyabrsky, Russia.

Abstract. The described method allows us to determine the values of the unknown parameters that characterize the work of the "formation-borehole-equipment", only in case of measured values of the liquid rate during well operation in different modes with unknown K_{mp} . This is particularly important in establishing technological modes of wells, whose drilling is recently stopped, and especially of controlled directional wells, where the values of the required parameters cannot be determined by direct measurement, and the determination of their values by dynamic levels is associated with low accuracy due to phase redistribution of a gas-liquid mixture in the wellbore.

In these cases, to determine required operating parameters of the system, lines of pressure increment are drawn by the above procedure on any paper, and then, by moving it along the nomogram until it coincides with one of the curves, the values of the required parameters are determined.

Applying the above procedure, by one or several values of one of measured parameters characterizing the operation of an individual unit, the nomogram also allows us to determine values of other parameters required to establish the optimal operation mode of the system "formation-borehole-equipment" as a whole, for example, the equipment at a rate of flow, etc.

These values of liquid lifting speed in a column of the well, given in the nomogram, allow us to determine time required to:

- get pressure increment sufficient to determine other parameters with accuracy satisfying solutions of tasks;
- restore full pressure in the well to formation pressure.

Parameters characterizing the operation of the well and found by such procedure contribute to determination of relevant operation parameters of the formation, and vice versa, which facilitates the task of establishing not only the operation mode of an oil-bearing formation as a whole, but also parameters of individual streaks, making up the oil-bearing formation.

Keywords: options, methods, nomogram, factor, formula, pressure, rate, equipment.

References

1. Adonin A.N. *Protsessy glubinno-nasosnoy nefteobychi* [Processes of deep pumping oil production]. Moscow: Nedra, 1964, 264 p.
2. Timashev A.T., Ziyakaev Z.N. K metodike opredeleniya rentabelnosti ekspluatatsii skvazhin, neftenosnykh zalezhey i razrabotki nefyanogo mestorozhdeniya. [On techniques to determine profitability of operation of wells, oil deposits and oil deposit development]. *Neft i gaz: problemy dobychi nefi, transporta, khraneniya i pererabotki: mezhvuz. sb. nauch. tr.* [Oil and gas: problems of oil production, transportation, storage and processing: interuniversity collection of research papers]. Ufa, 1998.
3. Timashev A.T. *Ustanovka skvazhinnogo shtangovogo nasosa* [Oil well pump]. Patent RF, no. 2016235, 1994.
4. Urazakov K.R. *Mekhanizirovannaya dobycha nefi (sbornik izobreteniy)* [Artificial oil lift (collection of inventions)]. Ufa: Neftgazovoe delo, 2010, 329 p.
5. *Spravochnaya kniga po dobyche nefi. Pod red. Sh.K. Gimatudinova* [Reference book on oil production, edited by Sh.K. Gimatudinov]. Moscow: Nedra, 1974, 267 p.

УДК 622.83:[528.2:629.78]

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ CORS ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССА СДВИЖЕНИЯ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ УРАЛЬСКОГО РЕГИОНА*

Панжин А.А.

Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

Аннотация. Приведено решение проблемы выбора опорных реперов для контроля процесса сдвижения, которые могут считаться относительно свободными от влияния естественных и техногенных деформационных процессов, сопровождающих разработку глубокозалегающих месторождений Урала. Для целей практического использования привязка опорных реперов наблюдательных станций к сети IGS может быть осуществлена с использованием CORS (Continuously Operating Reference Station) постоянно действующих опорных станций, накопление данных на которых происходит в круглосуточном режиме.

Ключевые слова: процесс сдвижения, современная геодинамика, деформационные процессы, рудные месторождения, опорный репер, GPS, CORS.

Введение

При контроле процесса сдвижения на горнодобывающих предприятиях одним из основных вопросов является выбор и обоснование методики инструментальных измерений [1]. Ключевой проблемой при этом является выбор опорных (исходных) реперов, пространственное положение которых остается неизменным на весь период мониторинговых наблюдений и свободно от влияния деформационных процессов как естественного (криповые подвижки), так и техногенного (сопровождающих разработку месторождения) происхождения [2].

Иерархически блочная структура породного массива, являющаяся вмещающей средой месторождений полезных ископаемых, предопределяет формирование в массиве горных пород напряженно-деформированного состояния, при этом в условиях нарушения межблочных связей происходит деформирование среды по границам структурных блоков. При масштабной разработке месторождений полезных ископаемых подвижки, вызванные суммарным воздействием естественных и техногенных факторов геодинамических процессов, достигают значительных величин.

Современные геодинамические движения

Экспериментальными исследованиями ИГД УрО РАН выявлены два вида современных геодинамических движений – трендовые (криповые) и циклические. Трендовые движения в виде взаимных подвижек соседних структурных блоков массива горных пород с относительно постоянными скоростью и направлением в течение продолжительного

промежутка времени, сопоставимого со сроком службы объекта. Циклические движения носят полигармонический характер и состоят из многочисленных знакопеременных движений с разными частотами и амплитудами перемещения в циклах.

Трендовые движения могут иметь как естественную природу, обусловленную тектоническими подвижками по границам структурных блоков, так и техногенную, обусловленную перераспределением напряжений и деформаций в породном массиве под воздействием горных работ, откачки подземных вод и других факторов. Зафиксированные инструментальными методами величины трендовых смещений составляют от 0,5 мм/год для имеющих естественную природу, до 200 мм/год для техногенных [2].

Короткопериодные циклические движения имеют широкий полигармонический спектр частот с продолжительностью циклов от 30–60 с до 1 ч, нескольких часов, суток и более. Максимальные амплитуды вертикальных смещений достигают 85–100 мм, горизонтальных 50–65 мм, а максимальные деформации, вызванные смещениями, достигают по растяжению–сжатию $1,2 \cdot 10^{-3}$, по наклону $2,5 \cdot 10^{-3}$.

Совместное воздействие обоих видов геодинамических движений придает массиву горных пород и земной поверхности постоянную подвижность, которая выступает как естественная форма существования геологической среды (рис. 1). Под их воздействием в массиве горных пород, имеющем иерархически блочную структуру, протекает комплекс сложных геомеханических процессов, из которых для безопасности объектов недропользования имеют значение: деструкция, самоорганизация, переход в тиксотропное состояние и концентрация геодинамических движений в граничных зонах структурных блоков.

* Исследования выполнены в составе интеграционного проекта Президиума УрО РАН № 12-И-5-2050 и гранта РФФИ № 14-05-00324.



Permanent GPS station

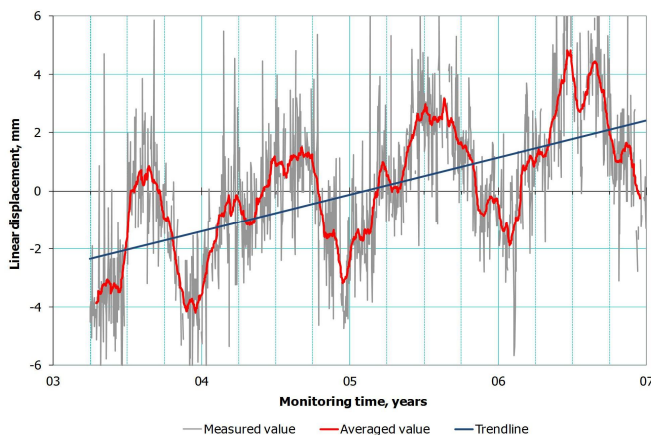


Рис. 1. Трендовые и циклические геодинимические движения по результатам мониторинга на постоянно действующей GPS станции Екатеринбург

Исследование геодинимических движений

По действующим нормативным документам, регламентирующим проектирование и создание наблюдательных станций для контроля процесса сдвига, считается, что опорный репер, находящийся на расстоянии далее чем трехкратной глубины разработки, не подвержен влиянию горных работ, исходя из этого исходные пункты геодезической и маркшейдерской сети, находящиеся вне мульды сдвига, считаются абсолютно неподвижными в плановой и высотной плоскостях.

На сегодняшний день при контроле за процессом сдвига на горных предприятиях России применяются методики, разработанные в 60-х годах XX века институтом ВНИМИ. Действующая редакция «Инструкции по наблюдениям за сдвижением горных пород и земной поверхности при подземной разработке рудных месторождений» утверждена Госгортехнадзором СССР в 1986 г. Развитие современной приборной базы – электронно-цифровых тахеометров и нивелиров и комплексов спутниковой геодезии поставило инструментальные измерения на качественно новый уровень, однако при этом геодезические построения опираются на репера, находящиеся на деформируемом массиве [3].

Фактически современными исследованиями в области геомеханики доказано, что формирование напряженно-деформированного состояния в области недропользования подчиняется более сложным геомеханическим процессам, влияние которых распространяется на значительные территории. Так, ИГД УрО РАН теоретически обосновано и инструментальными измерениями установлено, что деформирование породного массива, вызванное горными работами, охватывает территории площадью несколько сотен квадратных километров [4]. В этих условиях использование в качестве опорных пунктов наблюдательной станции реперов, простран-

ственное положение которых является нестабильным, приводит к неполному учету параметров процесса сдвига.

В последние годы, в связи с развитием систем спутникового позиционирования и широким внедрением их в маркшейдерско-геодезическую практику, появилась возможность при производстве мониторинговых наблюдений за развитием процесса сдвига привязки наблюдательной станции, расположенной в мульде сдвига или прибортовом массиве, производить от исходных пунктов, как правило ГГС (государственной геодезической сети), расположенных вне зоне влияния горных работ. Однако в этом случае минимизация влияния на пространственное положение опорных реперов техногенных факторов не приводит к неизменности их положения вследствие воздействия естественных факторов, таких как криповые подвижки по границам структурных блоков.

Трендовые движения определяются на основе анализа изменений пространственных приращений координат (векторов) ΔX , ΔY , ΔZ между пунктами геодезических сетей или специально оборудованных реперов наблюдательных станций, выполненных в промежутках между повторными циклами измерений (рис. 2).

Использование комплексов спутниковой геодезии GPS и GLONASS позволяет определять сдвига между пунктами мониторинговой геодинимической сети с точностью до 1–3 мм в разовом режиме, при долговременных непрерывных мониторинговых измерениях достигается точность до 0.1 мм/год. Полученные в результате инструментальных наблюдений деформации интервалов с использованием математического аппарата механики сплошной среды могут быть преобразованы в тензорное представление деформационного поля с выделением главных компонентов тензора деформаций. В случае, если необходимо определение величин и направ-

лений векторов трендовых движений, геодезическая привязка опорных реперов наблюдательной станции и их абсолютное позиционирование осуществляется от пунктов глобальной сети IGS, пространственное положение которых определяется в динамической системе координат ITRF.

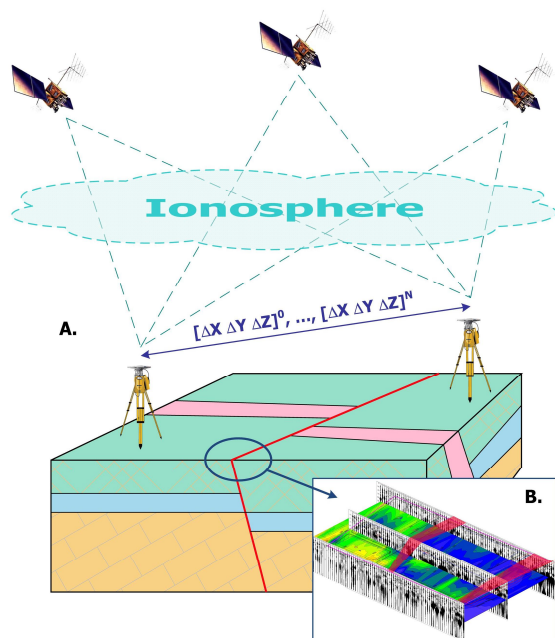


Рис. 2. Методика определения современных геодинамических движений (А) и выявления активных тектонических структур (В)

Пространственная привязка опорных реперов

В ходе исследований по идентификации относительных деформаций и установлении их взаимосвязи с абсолютными подвижками была определена возможность построения наблюдательных станций, пространственная привязка которых осуществляется от пунктов глобальной сети IGS, абсолютные координаты которых определяются в динамической системе координат ITRF.

На Урале находится только одна IGS станция, длина векторов до других, стабильно работающих станций MOBN (Москва), ZECK (Зеленчукская), NVSK (Новосибирск) и SELE (Алматы) составляет 1600–1800 км, поэтому для обеспечения необходимой точности координатных определений необходимо поддержание базовых приемников в круглосуточном режиме, что не всегда достижимо в реальных полевых условиях.

Для целей практического использования привязка опорных реперов наблюдательных станций к сети IGS может быть осуществлена с использованием CORS (Continuously Operating Reference Station) постоянно действующих опорных станций, накопление данных на которых

происходит в круглосуточном режиме [5].

Так, для месторождений Среднего и Южного Урала привязка опорных реперов наблюдательных станций может осуществляться с использованием постоянно действующих GPS станций, работающих в Екатеринбурге, Челябинске, Нижнем Тагиле и др. При этом средне-квадратическая ошибка определения пространственных координат, по результатам статистической обработки серии из 10 суточных измерений, составляет 2–3 мм по каждой координатной оси в геоцентрической системе координат, что является достаточным для абсолютной привязки наблюдательных станций и геодинимических полигонов [6].

Поскольку основной особенностью исследования деформаций породного массива в мониторинговом режиме является многократное, от цикла к циклу, выполнение точных геодезических измерений на одних и тех же пунктах сети, по одной программе работ с дальнейшим анализом изменений геометрических взаимосвязей между реперами, при выполнении исследовании отсутствует необходимость перевода координат реперов наблюдательной станции в принятую статичную государственную или местную систему координат с установлением достаточно сложных коэффициентов перехода между статичной и динамической системами (рис. 3).

Одним из ограничений, препятствующих широкому применению привязки опорных реперов наблюдательных станций к сети IGS, является необходимость использования в качестве связующего звена постоянно действующих GPS-станций или поддержание базовых приемников в круглосуточном режиме, что не всегда достижимо в реальных полевых условиях. В настоящее время в ИГД УрО РАН проводятся исследования по возможности высокоточной привязки опорных реперов к сети IGS с использованием локальных базовых станций, состоящих из двух и более синхронно работающих GPS-приемников. Как правило, при проведении мониторинговых наблюдений обеспечивается накопление спутниковых данных на полевых референсных станциях в течение нескольких дней подряд, по 8–10 ч на серию, что дает предпосылки для их использования в качестве переходного звена в привязке к глобальным геодезическим сетям.

Поставлен ряд экспериментов, в ходе которых прорабатывались альтернативные варианты геодезической привязки опорных реперов геодинамических полигонов Высокогорского ГОКа, Качканарского ГОКа и Пунгинского подземного хранилища газа, при этом установлена принципиальная возможность получения координат полевых станций с точностью порядка 5 мм от пунктов глобальной сети IGS, в настоящее время прорабатываются варианты практической реализации.

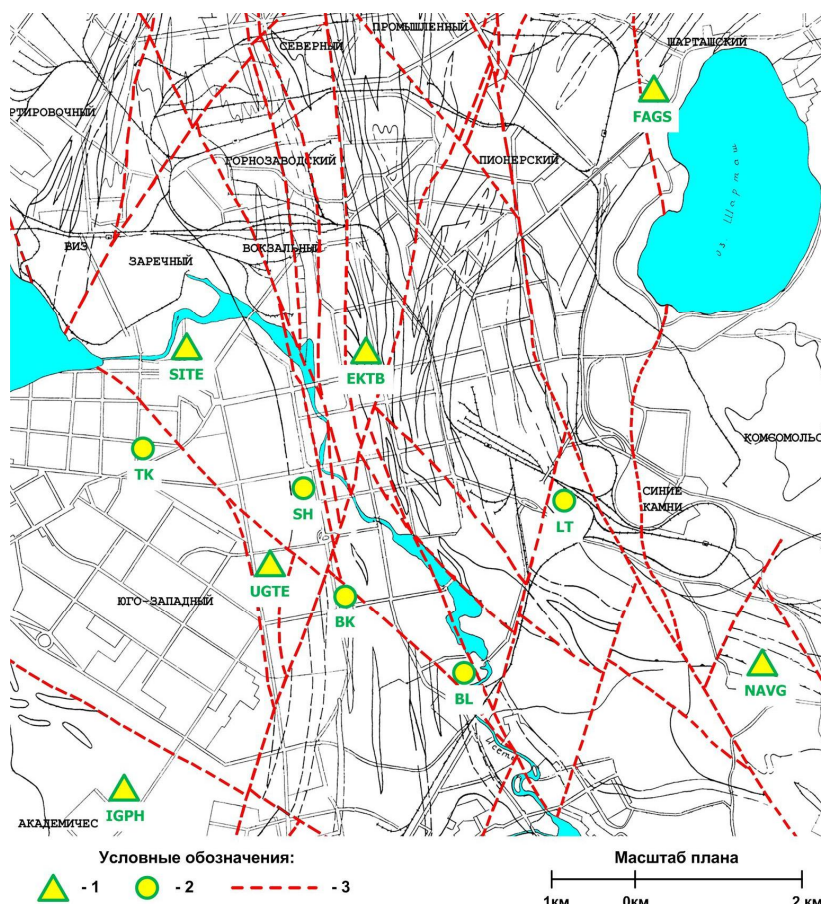


Рис. 3. Схема геодинамического полигона г.Екатеринбурга с постоянно действующими GPS-станциями:
1 – постоянно действующие GPS-станции; 2 – репера геодинамического полигона;
3 – тектонические нарушения

Заключение

Разработана методика абсолютной привязки опорных реперов наблюдательных станций к CORS для центрирования и ориентирования в динамической системе координат сетей более низкого иерархического уровня, охватывающих непосредственно мульд сдвижения при подземном и прибортовой массив при открытом способах разработки. Использование в качестве геодезической основы опорных реперов для контроля процесса сдвижения, которые могут считаться относительно свободными от влияния естественных и техногенных деформационных процессов, сопровождающих разработку глубокозалегающих месторождений Урала, позволит более полно учитывать влияние негативных последствий ведения горных работ.

Список литературы

1. Панжин А.А., Панжина Н.А. Об особенностях проведения

геодинамического мониторинга при разработке месторождений полезных ископаемых Урала с использованием комплексов спутниковой геодезии // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых (ФТПРПИ). 2012. № 6. С. 46–55.

2. Панжин А.А. Роль тектонических нарушений в процессе сдвижения на рудниках Высокогорского ГОКа // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2005. № 4. С. 131–136.
3. Панжин А.А. Исследование сдвижений земной поверхности при разработке месторождений с применением площадных инструментальных методов // Изв. вузов. Горный журнал. 2009. № 2. С. 69–74.
4. Панжин А.А. Исследование гармоник квазипериодических временных деформаций породного массива на больших пространственно-временных базах // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2010. № 9. С. 313–321.
5. Панжин А.А. Исследование деформирования породных массивов на больших пространственно-временных базах с использованием постоянно действующих станций // Изв. вузов. Горный журнал. 2008. № 8. С. 59–66.
6. Панжин А.А. Решение проблемы выбора опорных реперов при исследовании процесса сдвижения на объектах недропользования // Маркшейдерия и недропользование. 2012. №2. С. 51–54.

STUDY OF CORS GEODYNAMIC MOVEMENTS TO SUBSTANTIATE CONTROL METHODS OF THE DISPLACEMENT PROCESS IN DEPOSITS OF THE URAL REGION

Panzhin Andrey Alexeevich – PhD (Eng.), Scientific Secretary, Institute of Mining, UB, RAS, Ekaterinburg, Russia. Phone: +7(343)350 44 76. E-mail: panzhin@igduran.ru.

Abstract. This paper gives a solution to the problem of choosing survey marks to control the displacement process, which can be considered relatively free from the influence of natural and man-made deformation processes accompanying the development of deep deposits of the Urals. For the purposes of a practical use survey marks of monitoring stations may be bound to the IGS network using CORS (Continuously Operating Reference Stations), which continuously accumulate data.

Keywords: process of displacement, modern geodynamics, deformation processes, ore deposits, survey mark, GPS, CORS.

References

1. Panzhin A.A., Panzhina N.A. Satellite geodesy-aided geodynamic monitoring in mineral mining in the Urals. *Journal of Mining Science*, 2012, no. 48(6), pp. 982-989.
2. Panzhin A.A. The role of tectonic disturbances in the process of shifting the mines of the Vysokogorsky Ore Mining and Processing Plant. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2005, no. 4, pp. 131-136.
3. Panzhin A.A. Study of the Earth's surface displacement when developing ore deposits using areal instrumental procedure. *News of higher educational institutions. Mining Journal*, 2009, no. 2, pp. 69-74.
4. Panzhin A.A. Study of harmonics of quasiperiodic modern rock mass deformations in large spatial-temporal bases. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2010, no. 9, pp. 313-321.
5. Panzhin A.A. Study of deformation of rock masses in large spatial-temporal bases using continuously operating stations. *News of higher educational institutions. Mining Journal*, 2008, no. 8, pp. 59-66.
6. Panzhin A.A. Solving the problem of the choice of survey marks in the study of the displacement process at the facilities of subsoil use. *Mine surveying and subsoil use*, 2012, no. 2, pp. 51-54.

УДК 622.341; 669.162

РАЗРАБОТКА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ОСНОВ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЫСОКОМАГНЕЗИАЛЬНЫХ СИДЕРИТОВ

Клочковский С.П., Смирнов А.Н., Савченко И.А.

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

Аннотация. В статье приведены результаты исследований, которые могут быть положены в основу модернизации ныне применяемой технологии, или использованы для разработки основ технологии комплексной переработки высокомагнезиальных сидеритов, удовлетворяющей современным экологическим требованиям. Установлено, что применение разработанных принципов для переработки сидеритовых руд Бакальского месторождения позволяет получать два продукта: железорудный концентрат с содержанием железа на уровне 60% (против 50–52% по применяемой технологии) и магнезию, с содержанием оксида магния не ниже 98%.

Ключевые слова: сидеритовая руда, оксид магния, обжиг, выщелачивание, угольная кислота, магнезиоферрит, магнезиовустит, рентгеноструктурный анализ.

Введение

Проблема повышения качества, конкурентоспособности и роста объемов потребления железорудного сырья вызывает необходимость вовлекать в производство руды, которые по тем или иным причинам не могли быть использованы в металлургии или использовались в ограниченных объемах. К таковым относятся сидериты с высоким содержанием оксида магния, например руды Бакальского месторождения (Россия,

Челябинская область), запасы которых составляют свыше 1 млрд т. Бакальские сидериты обладают высокой стабильностью химического состава, низким содержанием вредных примесей: фосфора менее 0,05%, серы 0,1–0,3%. В то же время содержание оксида марганца в них доходит до 2%. Всё это делает бакальские сидериты перспективным сырьем как для получения высококачественных сталей, так и реализации процессов прямого восстановления железа. Основным препятствием, ограничивающим широкое использование бакальских сидеритов, является относительно низкое содержание же-

леза ($\text{Fe}_{\text{общее}}$ 27–30%) и высокое содержания оксида магния (MgO от 10% и выше). Создание экологически безопасных и ресурсосберегающих схем переработки руд подобных месторождений является насущной проблемой. Экономика этих схем будет определяться степенью извлечения железа и сопутствующих элементов. Комплексное использование руд Бакальского месторождения предполагает, в отличие от ранее реализованных схем, не только повышение содержания железа в железорудном концентрате, но и получения второго продукта – магнезии, с содержанием оксида магния не менее 98% или различных солей магния [1]. Результаты исследований, которые рассмотрены в данной работе, могут быть использованы для разработки основ технологии комплексной переработки высокомагнезиальных сидеритов, удовлетворяющей современным экологическим требованиям.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Характеристика сидеритовых руд Бакальского месторождения и существующей технологии их переработки

Основным рудообразующим минералом бакальских карбонатных железных руд является сидероплезит, на который приходится, в среднем, 75–80%. Нерудные материалы: доломит, кварцит, алюмосиликаты сланцы составляют 20–25% (табл. 1). Химический состав бакальских сидеритов приведен в табл. 2.

Таблица 1

Минералогический состав бакальских сидеритов

Минеральные составляющие	Содержание, %
Сидероплезит	75–80
Гидроксиды железа	< 1
Кварц-серицитовые сланцы, диабаз	8–12
Кварц, кварцит	11–12
Пирит	< 0,1

Таблица 2

Усредненный химический состав бакальских сидеритов

2007 год								
Fe	FeO	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	SiO ₂	MnO	Al ₂ O ₃	п.п.*
30,1	34,6	4,6	9,4	3,7	9,4	1,3	3,4	33
2012 год								
Fe	FeO	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	SiO ₂	MnO	Al ₂ O ₃	П.п.
29,3	37,1	0,7	12,0	5,3	2,5	1,1	1,0	35,8

* п.п. – потери при прокаливании.

Оптические и электронно-микроскопические исследования показали, что в бакальских сидеритах имеются как макроскопические, так и микроскопические включения нерудных материалов (рис. 1), которые, в принципе, могут быть удалены с использованием традиционных способов обогащения

(например, сухая или мокрая магнитная сепарация, флотационные, электростатические методы и др.). Разделение же железа и магния как в исходной руде, так и продуктах ее обжига с применением традиционных способов обогащения невозможно, т.к. и в том, и в другом случае они входят в общую кристаллическую решетку. Поэтому продукт, концентрат обожженного сидерита (КОС), получаемый по ныне применяемой технологии переработки бакальских сидеритов, которая сводится к обжигу сырой руды в шахтных печах при температуре 1000–1100°C в окислительной атмосфере и сухой магнитной сепарации, состоит, в основном, из химически устойчивой шпинели – магнезиоферрита (MgFe_2O_4) и содержит до 18% оксида магния:

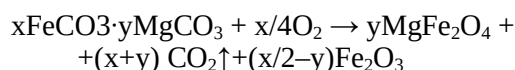


Рис. 1. Макро- и микровключения нерудных материалов в бакальской руде

Для получения качественного железорудного сырья необходима модернизация ныне применяемой технологии или создание технологии комплексной переработки высокомагнезиальных сидеритов.

Практически приемлемым направлением в получении продукта с малым содержанием оксида магния является структурное разрушение кристаллической решетки методами пиро- и гидрометаллургии. Первое направление – это

высокотемпературный восстановительный обжиг, приводящий к выделению железа в самостоятельную фазу [2]. Однако это направление, в настоящее время, не является рентабельным и не предполагает получение второго продукта, т.е. оксида магния, который переходит в шлак.

Второе направление – химическое обогащение руды или продукта ее термического разложения (выщелачивание) должно основываться на применении способа (реагента), обеспечивающего селективное извлечение одного из компонентов. Предлагаемые способы выщелачивания оксида магния с использованием сильных минеральных кислот (H_2SO_4 , HCl , HNO_3) не пригодны как с экономической, так и экологической точки зрения.

Проведенные исследования показали, что для получения железорудного концентрата с малым содержанием оксида магния можно селективно выщелачивать последний, используя слабую угольную кислоту (раствор диоксида углерода в воде). Для этого необходимо проводить обжиг высокомагнезиальных сидеритов в условиях, которые препятствовали бы образованию магнезиоферрита, т. н. «мягкий обжиг», проводимый при пониженных температурах, в отсутствии свободного кислорода. Диоксид углерода, образующийся при диссоциации сидероплезита, можно использовать для выщелачивания оксида магния. В этом случае, в отличие от ранее реализованных схем, возможно не только повышение содержания железа в железорудном концентрате, но и получение второго продукта – магнезии, с содержанием оксида магния не менее 98%, или различных солей магния. Получение двух продуктов повышает рентабельность технологии переработки высокомагнезиальных сидеритов.

Результаты термогравиметрии, электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа

Термограмма (рис. 2) демонстрирует, что диссоциация сырой руды начинается при температурах ниже 400°C , а заканчивается при температуре выше 750°C . Полное разложение сидероплезита происходит при температурах менее 650°C , тогда как разложение минералов типа магнезит, доломит, кальцит происходит при более высоких температурах (второй пик, см. рис. 2). Таким образом «мягкий обжиг» сырой руды соответствует обжигу при температурах $550\text{--}650^\circ\text{C}$, при которых разлагается только сидероплезит, без доступа атмосферного воздуха (время обжига определяется по прекращению выделения диоксида углерода). Продукт разложения сидероплезита ферромагнетит, что позволяет отделять его от основной части нерудных материалов.

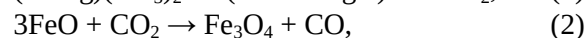
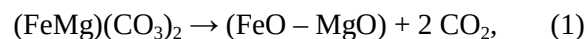
Электронно-микроскопические и рентгеноструктурные исследования показали, что КОС, полученный в условиях «мягкого обжига», в ос-

новном состоит из магнетита (Fe_3O_4), магнезиовюстита (твердый раствор FeO-MgO), не большого количества периклаза и, возможно, магнезиоферрита (рис. 3). В КОСе, кроме того, присутствуют вкрапления примесных пород – кальцит, доломит, кварцит и др.

Необходимо отметить, что магнетит Fe_3O_4 ($\text{Fe}^{2+}2\text{Fe}^{3+}\text{O}_4$) и магнезиоферрит MgFe_2O_4 ($\text{Mg}^{2+}2\text{Fe}^{3+}\text{O}_4$) имеют идентичную кристаллическую структуру. Поэтому пики на дифрактограмме будут практически идентичными. Разница между этими двумя минералами в том, что одна и та же кристаллографическая позиция в структуре занята либо Fe^{2+} , либо Mg^{2+} . Количество того или иного может меняться от 0 до 1. Например, магнезиоферрит может иметь различное содержание Fe: $(\text{Mg}_{0,9}\text{Fe}_{0,1})\text{FeO}_4$ или $(\text{Mg}_{0,5}\text{Fe}_{0,5})\text{FeO}_4$ и т.д. В зависимости от того, сколько Mg и сколько Fe содержится в данном минерале, интенсивность пиков будет немного варьировать, а позиция пиков может слегка меняться.*

В случае магнезиовюстита, как показали рентгеноструктурные исследования, в составе КОС имеются твердые растворы переменного состава – от $(\text{FeO})_{0,407}(\text{MgO})_{0,593}$ до $(\text{FeO})_{0,09}(\text{MgO})_{0,91}$.

Образование основных фаз при «мягком обжиге» сидероплезита можно объяснить за счет протекания реакций:



Наличие свободного углерода подтверждается химическими и электронно-микроскопическими методами. Из КОСа, полученного в условиях «мягкого обжига», можно извлечь до 50% содержащегося в нем оксида магния угольной кислотой в течение 5 ч, при температуре $20\text{--}25^\circ\text{C}$ и давлении CO_2 , равном одной атмосфере [3].

С целью повышения степени извлечения оксида магния и увеличения скорости процесса его выщелачивания были изучены различные способы активации КОСа. Активацию проводили после «мягкого обжига» и магнитной сепарации. Было установлено, что активация может быть достигнута за счет дезинтеграции, в первую очередь магнезиовюстита, фазы, в которой в основном и содержится оксид магния (рис. 4).

* Мессбауэровский спектр магнетита представляет собой суперпозицию двух секстетов, один из которых относится к ионам Fe^{3+} в тетраэдрической позиции (А), а другой к ионам $\text{Fe}^{3+} + \text{Fe}^{2+}$ в октаэдрической позиции (В). Анализ мессбауэровского спектра КОС показал, что происходит вхождение Mg^{2+} в октаэдрическую подрешетку (В). Исследования были выполнены на спектрометре СМ2201 с источником излучения ^{57}Co в матрице Rh, а анализ результатов проведен с помощью программы Univem-2 (Институт минералогии РАН, г. Миасс, Миронов А.Б., Никандрова Н.К.).

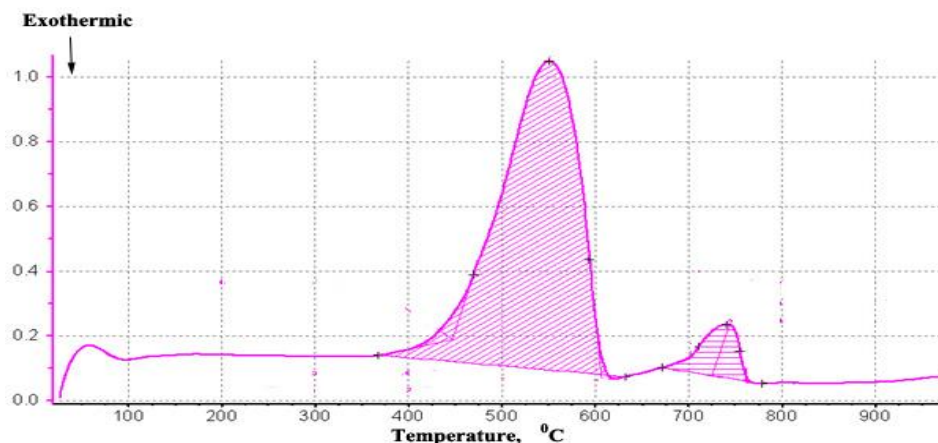


Рис. 2. Термограмма сырой руды бакальского месторождения

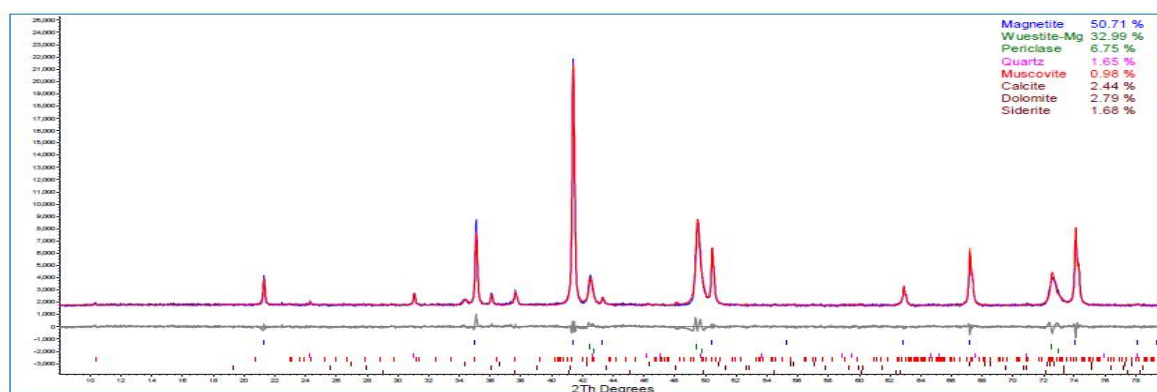


Рис. 3. Дифрактограмма КОС, полученного в условиях мягкого обжига (количественный анализ проведен с помощью программного пакета DIFFRAC.TOPAS (версия 4.2), дифрактометр D8 ADVANCE, лаборатория Bruker AXS, Karlsruhe, Германия, Гавриленко Полина)

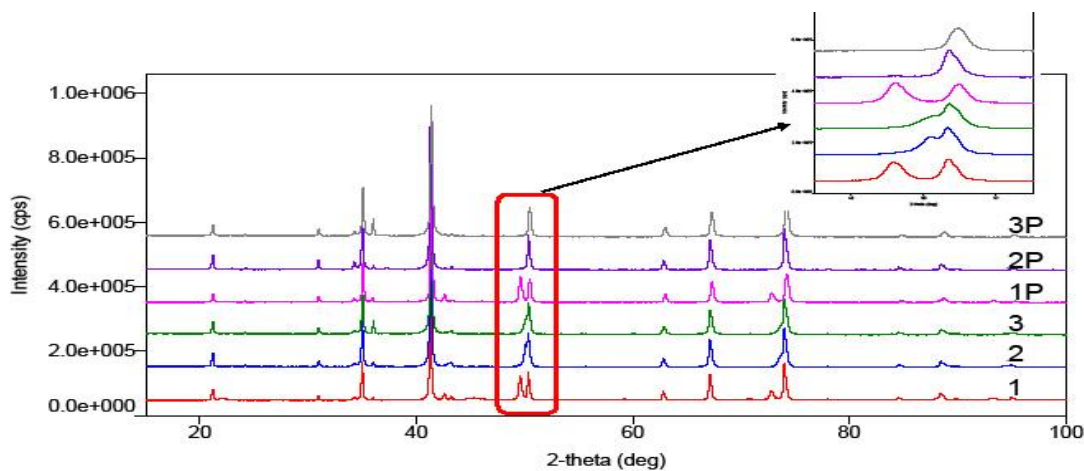


Рис. 4. Дифрактограммы КОС (1–3) и соответствующие им дифрактограммы железорудного концентрата (1P–3P)

По данным рентгеновской дифрактометрии до активации в КОС содержалось около 20% магнезиовюститита состава $(\text{FeO})_{0,407}(\text{MgO})_{0,593}$ (см. рис. 4, дифрактограмма 1), а после активации в образцах присутствовала только магнезиовюстититная фаза состава $(\text{FeO})_{0,09}(\text{MgO})_{0,91}$

(рис. 4, дифрактограмма 2, 3).

Анализ состава образцов железорудного концентрата, которые были получены из КОСа до активации (см. рис. 4, дифрактограмма 1P) и после активации (см. рис. 4, дифрактограмма 2P, 3P), показал, что после выщелачивания угольной

кислотой в образцах 2Р и 3Р полностью отсутствует магнезиовюститная фаза состава $(\text{FeO})_{0,09}(\text{MgO})_{0,91}$, а в образце 1Р магнезиовюститная фаза $(\text{FeO})_{0,407}(\text{MgO})_{0,593}$ присутствует. Это означает, что оксид магния, входящий в состав магнезиовюститной фазы $(\text{FeO})_{0,09}(\text{MgO})_{0,91}$, полностью удаляется (выщелачивается угольной кислотой), тогда как из магнезиовюститной фазы $(\text{FeO})_{0,407}(\text{MgO})_{0,593}$ он удаляется лишь частично (исследования были выполнены на дифрактометре MiniFlex (Rigaku Corporation, Application Laboratories, Tokyo, Bing Yue)).

Получение магнезии и железорудного концентрата в лабораторных условиях

Как было отмечено выше, из КОСа, который не подвергался активации, угольной кислотой можно извлечь до 50% содержащегося в нем оксида магния за 5 и более часов. Если же проводить активацию КОСа, то доля извлекаемого оксида магния составляет более 70% от первоначального всего за один час. Таким образом, за счет активации скорость выщелачивания оксида магния резко возрастает, а степень извлечения MgO из КОСа увеличивается с 50 до 70%. Данные результаты были получены в лабораторных условиях по следующей схеме: КОС, после «мягкого обжига» и активации, или без нее, подвергается сухой магнитной сепарации при напряженности магнитного поля 50–100 кА/м, затем извлеченную магнитную фракцию доизмельчают до крупности частиц 0,2–0 мм и помещают в реактор для выщелачивания, которое проводят раствором угольной кислоты при давлении углекислого газа в реакторе в одну атмосферу и постоянном перемешивании.

В табл. 3 приведены значения степени извлечения оксида магния из обожженного и активированного КОСа, в зависимости от времени выщелачивания [4]. Оксид магния переходит в раствор в виде растворимого бикарбоната магния: $\text{MgO} + 2\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$. Все остальные компоненты остаются в твердой фазе (оксид кальция переходит в раствор в незначительных количествах). Раствор отделяется от твердой фазы, нагревается до 80–90°C, при этом из него выпадает нерастворимый карбонат магния $\text{MgCO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$. Последний при прокаливании выше 650°C разлагается на оксид магния и диоксид углерода. Получающаяся при этом магнезия содержит не менее 98% MgO. Оставшаяся твердая фаза промывается водой, сушится и может быть использована для получения агломерата. Состав железорудного концентрата, полученного в соответствии с предлагаемой технологией, приведен в табл. 4.

Таблица 3

Степень извлечения оксида магния из обожженного и активированного КОСа, в зависимости от времени выщелачивания (соотношение твердое – жидкое 1/15, температура 22°C, $P_{\text{CO}_2} = 1$ атм., крупность частиц 0,2–0 мм, состав сырой руды – табл. 2, данные за 2012 год)

Продолжительность выщелачивания, мин	10	20	30	40	50	60	70	80
Степень извлечения, %	27	46	59	64	69	72	73	73

Оставшаяся твердая фаза промывается водой, сушится и может быть использована для получения агломерата. Состав железорудного концентрата, полученного в соответствии с предлагаемой технологией, приведен в табл. 4.

Таблица 4

Химический состав руды и продуктов, полученных в лабораторных условиях по технологии комплексного использования высокомагнезиальных сидеритов

Продукт	Fe _{общ}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Ca O	MnO	MgO	п.п.	Fe _{общ} MgO
Исходная руда, %	27,4	34,0	1,4	3,2	7,3	1,12	12,9	35,9	2,12
Магнитная часть КОС, %	51,6	21,9	49,4	2,5	1,7	1,72	17,8	3,5	2,9
Немагнитная часть (хвосты), %	13,5	11,3	87,3	5,9	19,0	0,75	13,0	38,1	1,04
Железорудный концентрат, %	61,2	0,2	82,6	2,7	2,0	1,93	5,7	3,1	9,87
Магнезия	0,09	–	–	0,125	0,83	0,05	98,5	0,2	–

Из приведенных данных видно, что соотношение железо – магний в полученном продукте повысилось до 9,87 против 2,9 в КОСе. Значительное повышение содержания железа в железорудном концентрате произошло, прежде всего, за счет извлечения более 70% содержащегося в КОСе оксида магния.

Выводы:

1. Установлено, что при обжиге сидереплети в «мягких условиях» образуется продукт, состоящий в основном из магнетита, магнезиовюстит, небольшого количества периклаза и, возможно, магнезиоферрита. Из этой совокупности фаз возможно извлечение оксида магния раствором угольной кислоты, но процесс идет с невысокой скоростью и доля удаленного оксида магния не превышает 50%.

2. Для увеличения полноты и скорости выщелачивания оксида магния необходима активация КОСа, которая почти на порядок увеличивает скорость выщелачивания и позволяет извлекать до 70% оксида магния раствором угольной кислоты.

3. Найдено, что активация обожженного в «мягких условиях» сидероплезита приводит к изменению количественного соотношения между компонентами фазы; в частности, магнезиовюстит состава $(\text{FeO})_{0,407}(\text{MgO})_{0,593}$ превращается в магнезиовюститную фазу состава $(\text{FeO})_{0,09}(\text{MgO})_{0,91}$. Вследствие этого почти на порядок возрастает скорость выщелачивания оксида магния и более чем на 40% повышается доля извлекаемого оксида магния.

4. Разработаны основные принципы технологии комплексного использования высокомагнезиальных сидеритов, применение которых позволяет извлекать до 70% содержащегося в обожженном сидерите оксида магния и получать железорудный концентрат с содержанием железа на уровне 60% и магнезию, с содержанием оксида магния не ниже 98%.

5. Применение технологии комплексного ис-

пользования высокомагнезиальных сидеритов не приведет к изменению экологических условий существующих способов переработки высокомагнезиальных сидеритовых руд, поскольку не предусматривает применение для выщелачивания MgO сильных кислот (соляной, серной, азотной), а также других соединений. Диоксид углерода, используемый при выщелачивании, получается при обжиге исходной руды.

Список литературы

1. Применение методов пиро- и гидрометаллургии для переработки сидеритовых руд с высоким содержанием оксида магния / Колокольцев В.М., Бессмертных А.С., Бигеев В.А., Клочковский С.П., Смирнов А.Н. // Горный журнал. Черные металлы: специальный выпуск. 2012. С. 22–24.
2. Пирометаллургическая переработка комплексных руд / Леонтьев Л.И., Ватолин Н.А., Шаврин С.А., Шумаков Н.С. М.: Металлургия, 1997. 432 с.
3. The Principles of Processing Siderite Ores with a high Magnesium Oxide Content / S. Klochkovskii, A. Smirnov // Defect and Diffusion Forum 2012. Vols. 326–328, pp. 111–114.
4. Клочковский С.П., Смирнов А.Н., Лаптев А.П. Кинетика выщелачивания оксида магния из продуктов обжига высокомагнезиальных сидеритов // Теория и технология металлургического производства: межрегион. сб. науч. тр. Магнитогорск, 2012. Вып. 12. С. 117–120.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DEVELOPMENT OF PHYSICO-CHEMICAL BASES OF AN OVERALL USE OF HIGH-MAGNESIA SIDERITES

Klochkovskiy Stanislav Pavlovich – Ph.D. (Chemistry), Magnitogorsk, Russia. Phone: +7 (3519) 42 31 11. E-mail: klochkovskiy37@mail.ru.

Smirnov Andrey Nikolayevich – Ph.D. (Physics and Mathematics), Head of the Department of Physical Chemistry and Chemical Technology, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. Phone: +7 (3519) 29 85 78. E-mail: sman@magtu.ru.

Savchenko Ilya Andreyevich – Postgraduate Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. E-mail: savchenkoilya@mail.ru.

Abstract. This article contains results of research which may be used as a basis for modernization of a currently applied technology or development of a basic technology for integrated processing of high-magnesia siderites, which satisfies current environmental requirements. It is found that the application of the developed principles for processing of siderite ores of the Bakal deposit allows us to produce both an iron ore concentrate with the content of iron up to 60% (in comparison with 50–52% of iron using the applied technology) and magnesia with the content of magnesium oxide higher than 98%.

Keywords: siderite ore, magnesium oxide, roasting, leaching, carbonic acid, magnesioferrite, magnesiowustite, X-ray structure analysis.

References

1. Kolokoltsev V.M., Bessmertrykh A.S., Bigeev V.A. Klochkovskiy S.P., Smirnov A.N. Application of pyro- and hydrometallurgical methods to process siderite ores with a high content of magnesium oxide. Mining Journal. Ferrous metals. Special Edition. 2012, pp. 22–24.
2. Leontev L.I., Vatin N.A., Shavrin S.A., Shumakov N.S. *Pirometallurgicheskaya pererabotka kompleksnykh rud* [Pyrometallurgical processing of complex ores]. Moscow: Metallurgy, 1997, 432 p.
3. Klochkovskii S., Smirnov A. The Principles of Processing Siderite Ores with a high Magnesium Oxide Content. Defect and Diffusion Forum 2012, Vols. 326–328, pp. 111–114.
4. Klochkovskiy S. P., Smirnov A. N., Laptev A. P. Kinetics of magnesium oxide leaching from products of roasting of high-magnesia siderite *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva* [Theory and technology of metallurgical production]. Magnitogorsk, 2012, iss. 12, pp. 117–120.

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

УДК 621.7

ВНЕПЕЧНАЯ ДЕФОСФОРАЦИЯ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОГО ПОЛУПРОДУКТА ПРИ ПЕРЕДЕЛЕ ВАНАДИЙСОДЕРЖАЩЕГО ЧУГУНА БЕСФЛЮСОВЫМ МОНОПРОЦЕССОМ

Смирнов Л.А.¹, Шульмин Д.С.¹, Смирнов А.Л.¹, Дерябин Ю.А.², Довголюк Л.В.¹¹ ОАО «Уральский институт металлов», г. Екатеринбург, Россия² ОАО «УРАЛГИПРОМЕЗ», г. Екатеринбург, Россия

Аннотация. Проведено исследование процессов внепечной дефосфорации низкоуглеродистого стального полупродукта. Проводили обработку металла ШОС системы CaO-FeO-CaF_2 при сливе в ковш. Установлена возможность получения степени дефосфорации 50-60% при исходном содержании фосфора в металле 0,050-0,060% и расходе смеси 3% от веса металла. Определен оптимальный состав дефосфорирующего шлака: $\text{CaO/FeO} = 3,5-4,0$, $(\text{CaO}) \approx 70-75\%$, $(\text{FeO}) \approx 20\%$. Показана перспективность вдувания порошковых дефосфорирующих смесей для увеличения степени дефосфорации металла до 80-90% и достижения $[\text{P}]_k \leq 0,005\%$.

Ключевые слова: бесфлюсовый монопроцесс, внепечная дефосфорация, твердые шлаковые смеси.

Введение

Передел ванадийсодержащих чугунов бесфлюсовым монопроцессом позволяет существенно увеличить производительность конвертеров за счет ликвидации выпуска и повторной заливки углеродистого полупродукта на промежуточной стадии, повысить полноту деванадации, получать качественный товарный ванадиевый шлак с низким содержанием P_2O_5 и CaO . Однако при отсутствии в составе конвертерного шлака оксидов кальция, дефосфорации и десульфурации металла не происходит, что подтверждается как лабораторными экспериментами [1], так и производственными данными (табл. 1) [2].

снижения $[\text{P}]_k \leq 0,010\%$ необходимо проводить дополнительную внепечную обработку с эффективностью удаления фосфора не менее 70–80%, практическая возможность которой подтверждается в ряде отечественных [3, 4] и зарубежных работ [5].

Содержание фосфора в готовой стали будет зависеть от его количества, вносимого с ферросплавами и восстанавливаемого из печного шлака. После внесения ферросплавов $[\text{P}]$ возрастает: для спокойной углеродистой стали – на 0,001–0,002%, для низколегированной – до 0,010%. Прирост $[\text{P}]$ от его восстановления из шлака составляет до 0,002–0,004%. В итоге в металл дополнительно попадает 0,003–0,005% фосфора, которые также необходимо учитывать при выплавке качественной и высококачественной стали.

Таблица 1

Содержание фосфора и углерода в металле при бесфлюсовом монопроцессе (160-т конвертер), %

Металл	Элемент, %	Номер плавки								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Чугун	P	0,040	0,045	0,021	0,031	0,025	0,034	0,027	0,030	0,027
Металл	P	0,045	0,039	0,023	0,039	0,031	0,037	0,032	0,033	0,035
после продувки	C	0,033	0,031	0,029	<0,09	<0,045	0,028	0,035	0,033	<0,044

Если флюсовый конвертерный процесс позволяет получать металл с $[\text{P}] < 0,010\%$ без дополнительной обработки, то в случае бесфлюсового монопроцесса полупродукт содержит $[\text{P}] \approx 0,025-0,045\%$ (табл. 1). В зависимости от состава шихтовых материалов в доменном процессе $[\text{P}]$ может повышаться до 0,05–0,06%. Следовательно, при бесфлюсовом монопроцессе для

Методика эксперимента

Для изучения закономерностей процесса внепечной дефосфорации низкоуглеродистого полупродукта провели серию опытов по обработке его при выпуске в ковш порошковыми смесями системы CaO-FeO-CaF_2 , масс. %: 1) 70 CaO , 20 FeO , 10 CaF_2 ; 2) 60 CaO , 30 FeO , 10 CaF_2 ; 3) 40 CaO , 40 FeO , 20 CaF_2 . Металл состава, % масс.: 0,04–0,15 C; 0,047–0,087 P; 0,055–0,128 S; V, Mn, Ti, Si – следы, расплавляли в 170-кг индукционной печи. По достижении температур 1660–1680°C металл сливали в хорошо прогретый ковш с магнезитовой футеровкой. При сливе полупродукт частично раскисляли алюминием и обрабатывали ШОС, крупностью – 0,5 мм в количестве 2, 2,5 и 3% от массы металла. После

обработки шлак скачивали. Пробы металла отбирали до и после слива в ковш.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты проведенных опытов и рассчитанные параметры дефосфорации приведены в табл. 2 и на рис. 1.

Таблица 2

Результаты опытов по дефосфорации низкоуглеродистого металла порошковой смесью

Параметр	Смесь 1			Смесь 2			Смесь 3	
Расход смеси, %	2,0	2,5	3,0	2,0	2,0	2,5	2,0	2,5
[P] _н , %	0,068	0,060	0,056	0,067	0,062	0,066	0,087	0,047
[P] _к , %	0,040	0,035	0,022	0,039	0,031	0,037	0,050	0,028
ΔP/1% расхода смеси	0,014	0,010	0,011	0,014	0,016	0,012	0,019	0,008
η _р , %	41,18	41,67	60,71	41,79	50,00	43,94	42,53	40,43
λ	0,019	0,024	0,028	0,019	0,019	0,024	0,018	0,024
L _p = (P ₂ O ₅)/[P] _к	85,58	68,83	124,71	87,78	122,95	75,97	93,46	65,78
[P] _{равн.} (1600 °С)	0,005	0,003	0,0023	0,006	0,006	0,005	0,034	0,0156

Из полученных данных видно, что степень удаления фосфора составляет 40,4–60,7%. Верхний предел соответствует смеси 1 – оптимальной по данным работы [3], при расходе 3%. При дефосфорации ШОС промежуточного состава (смесь 2) в количестве 2–2,5% окисляется около 42–50% фосфора. Худшие результаты показала смеси 3, с наиболее низкой концентрацией СаО в составе смеси. Десульфурации металла не происходила.

По результатам исследования выявлена четкая зависимость содержания фосфора в металле после обработки [P]_к от его исходной концентрации [P]_н (рис. 1, а). Эта взаимосвязь проявляется, несмотря на возрастание общего количества удаленного фосфора ΔP_{масс. %} (рис. 1, б). Количество удаленного фосфора, отнесенное к расходу смеси, можно считать мерой её удельной дефосфорирующей способности. Переход к удельному показателю позволяет устранить влияние расхода смеси и выявить достаточно надежную эмпирическую зависимость, охватывающую все экспериментальные точки (рис. 1, в).

Выявленные зависимости свидетельствуют о том, что реакция дефосфорации в указанных условиях является реакцией первого порядка и скорость процесса, в основном, лимитируется массопереносом фосфора к межфазной границе металл-шлак.

В результате происходящих процессов масса и состав шлака могут меняться, отклоняясь от массы и состава ШОС. На рис. 2 приведены зависимости удельной дефосфорирующей способности смеси и фактического коэффициента распределения фосфора L_p от соотношения (СаО)/(FeO) в конечном

шлаке. Некоторое возрастание эффективности дефосфорации с ростом отношения (СаО)/(FeO) до оптимальной величины ~ 3,5–4,5 объясняется, по-видимому, повышением фосфатной емкости шлака, при дальнейшем его росте ухудшаются условия шлакообразования и снижается окисленность шлака, а более низкие значения не обеспечивают получение шлака с достаточной основностью.

Наблюдается некоторое влияние величины угара углерода ΔC_{%масс.} на количество удаленного фосфора ΔP_{%масс.} с максимумом при ΔC = 0,025–0,035% и снижение эффективности дефосфорации с ростом начального содержания углерода в металле. В первом случае этот эффект может объясняться влиянием перемешивания металла пузырьками СО, а во втором – расходом кислорода на обезуглероживание и снижением начальной окисленности металла.

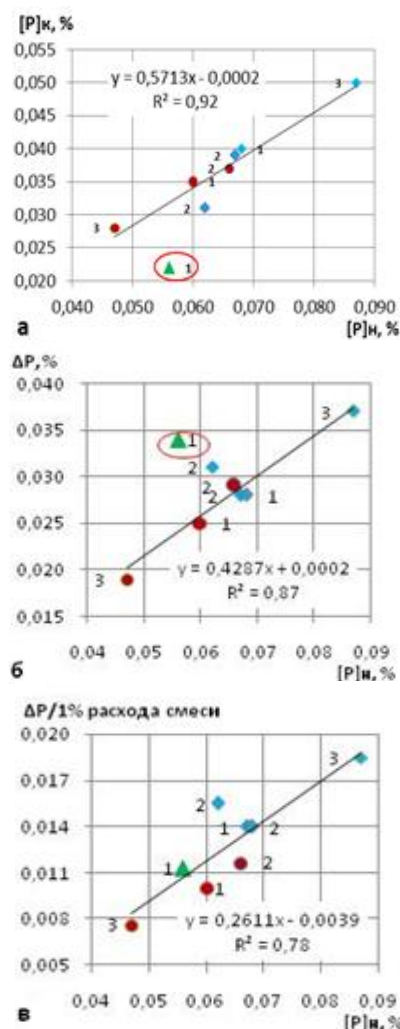


Рис. 1. Влияние [P]_н на показатели дефосфорации: а – [P]_к = φ([P]_н); б – Δ[P] = φ([P]_н); в – Δ[P]/1% расхода смеси = φ([P]_н). Здесь и далее: расход смеси – ♦ – 2,0%, ● – 2,5%, ▲ – 3,0% от веса металла, цифры у точек – номер смеси

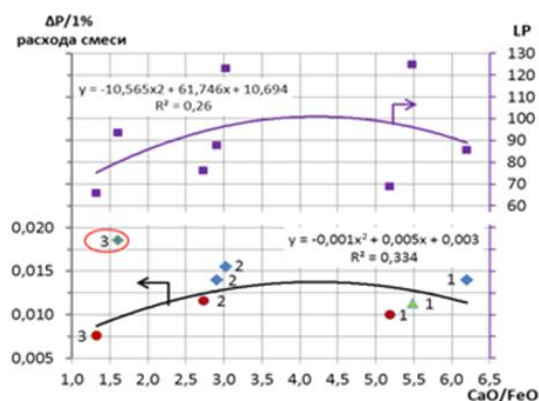


Рис. 2. Зависимость удельной дефосфорирующей способности смеси и коэффициента распределения фосфора от соотношения CaO/FeO в шлаке (точка 3♦ с $[P]_H = 0,087\%$ не входит в расчет уравнения корреляции)

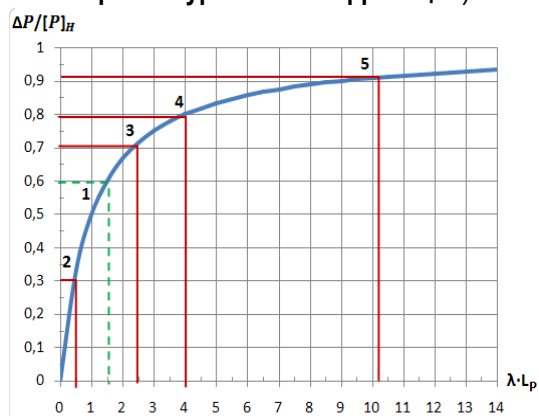


Рис. 3. Степень дефосфорации низкоуглеродистого металла шлаками системы CaO-FeO-CaF₂ в зависимости от $\lambda \cdot L_p'$. Кривая – расчет по уравнению (8). Цифры – см. текст

Представляет интерес сравнение фактически достигнутых концентраций фосфора в металле $[P]_K$ с равновесными $[P]_{равн}$, рассчитанных по доработанной методике Хили [6, 7]:

$$\lg L_p' = 22350/T - 20,504 + 5,6 \lg((CaO) + 0,72(CaF_2)) + 2,5 \lg(Fe) + C_1; \quad (1)$$

$$C_1 = 7,1 \lg \Sigma_+ - 9,6 \lg N'_O - 7,6 \lg K'_{CaO_{нас.}} - 2,5 \lg K'_{FeO}; \quad (2)$$

$$K'_{CaO_{нас.}} = 1 / N'_{Ca} N'_O; \quad (3)$$

$$K'_{FeO} = a_{FeO} / N'_{Fe} N'_O. \quad (4)$$

Расчет активности a_{FeO} проведен по формуле М.Я. Меджибожского:

$$a_{FeO} = ((FeO) \cdot 100) / (1,3(CaO) + (FeO) - 1,8(P_2O_5)). \quad (5)$$

Результаты расчета $[P]_{равн}$ при 1600°C приведены в табл. 2. Наблюдается значительное превышение $[P]_K$ над $[P]_{равн}$. Смесь 1 при $[P]_H = 0,047-0,066\%$ обеспечивает $[P]_{равн} = 0,002-0,005\%$, смесь 2 – $0,005-0,006\%$, а смесь 3 – $[P]_{равн} \geq 0,015\%$. Расчет-

ные значения $L_p'_{равн} = (P)/[P]_K$ при 1600°C достигали величины 693–893 для смеси 1, 497–533 для смеси 2, что согласуется с литературными данными для системы CaO_{нас.}-FeO-P₂O₅: $L_p'_{равн} = 300-400$ [7], $L_p'_{равн} = 650-800$ [8]. По полученным результатам прослеживается также зависимость $[P]_{равн}$ от соотношения (CaO)/(FeO) в шлаке, аналогичная экспериментальной.

Для анализа влияния распределения фосфора между шлаком и металлом, кратности шлака и технологических особенностей ввода ШОС на степень дефосфорации применялось уравнение материального баланса по фосфору:

$$M[P]_H + m_{ШОС}(P)_H = M[P]_K + m_{шл.}(P)_K, \quad (6)$$

где M – масса металла, кг; $m_{ШОС}$, $m_{шл.}$ – масса ШОС и конечного шлака соответственно, кг; $(P)_H$, $(P)_K$ – начальное и конечное содержание фосфора в шлаке, % масс. Принимая $(P)_H = 0$, в итоге получаем зависимости:

$$[P]_K = \frac{[P]_H}{1 + \lambda \cdot L_p'}; \quad (7)$$

$$\frac{\Delta[P]}{[P]_H} = 1 - \frac{1}{1 + \lambda \cdot L_p'}; \quad (8)$$

$$L_p' = \left(\frac{1}{1 - \frac{\Delta[P]}{[P]_H}} - 1 \right) / \lambda. \quad (9)$$

В условиях опытов максимальная кратность шлака составила 0,028, максимальный фактический $L_p' = 54,45$, а степень дефосфорации 60,7%. На рис. 3 цифрой 1 обозначено положение экспериментальных значений на диаграмме зависимости $\Delta P/[P]_H$ от параметра $\lambda \cdot L_p'$. На этот же график нанесены значения степени дефосфорации, полученные при различных технологических вариантах внепечной дефосфорирующей обработки низкоуглеродистого металла с $[P]_H \approx 0,055\%$. ШОС системы CaO-FeO-CaF₂ оптимального состава (7:2:1) при расходе смеси 2,5%:

1) выдержка металла со шлаком без перемешивания: $\eta_p = 31\%$; $[P]_K = 0,039\%$; $\lambda \cdot L_p' = 0,45$; $L_p' \sim 18$ («2» на рис. 3); 2) присадка на поверхность с последующей продувкой кислородом: $\eta_p = 71\%$; $[P]_K = 0,016\%$; $\lambda \cdot L_p' = 2,45$; $L_p' \sim 98$ («3» на рис. 3); 3) поверхностный подвод смеси в токе кислорода: $\eta_p = 80\%$; $[P]_K = 0,011\%$; $\lambda \cdot L_p' = 4$; $L_p' \sim 160$ («4» на рис. 3); 4) вдувание смеси в токе кислорода через трубу, погруженную в металл: $\eta_p = 91\%$; $[P]_K = 0,005\%$; $\lambda \cdot L_p' = 10,1$; $L_p' \sim 400$ («5» на рис. 3).

Таким образом, приведенные результаты свидетельствуют о высокой эффективности вду-

вания рафинировочной смеси в объем металла. Высокий $L_p' \sim 400$ говорит о значительном снижении диффузионных затруднений и приближении системы к равновесию [7, 8].

Выводы

Исследована внепечная дефосфорация низкоуглеродистого (0,04–0,15% С) полупродукта, получаемого при переделе ванадийсодержащего чугуна бесфлюсовым монопроцессом, обработкой ШОС системы CaO-FeO-CaF_2 при сливе металла в ковш. Установлена возможность получения степени дефосфорации 50–60% при исходном содержании фосфора в металле 0,050–0,060% и расходе смеси 3% от веса металла.

Определен оптимальный состав дефосфорирующего шлака: $\text{CaO/FeO} = 3,5\text{--}4,0$, $(\text{CaO}) \approx 70\text{--}75\%$, $(\text{FeO}) \approx 20\%$. Показана перспективность дувания порошковых дефосфорирующих смесей для увеличения степени дефосфорации металла до 80–90% и достижения $[P]_{\text{к}} \leq 0,005\%$.

Статья подготовлена при поддержке гранта РФФИ №13-08-12167.

Список литературы

1. Смирнов Л.А., Дерябин Ю.А., Довголюк Л.В. Поведение ванадия при продувке ванадиевого чугуна. Сообщение 2 // Изв. вузов. Черная металлургия. 1979. №12. С. 30–33.
2. Смирнов Л.А., Ровнушкин В.А., Смирнов А.Л. Новый технологический процесс передела ванадийсодержащего чугуна бесфлюсовым кислородно-конвертерным процессом // Сборник трудов XIII международного конгресса сталеплавателей. г. Полевской, 12–18 октября 2014 г. Москва; Полевской, 2014. С. 143–147.
3. Ладыженский Б.Н. Применение порошкообразных материалов в сталеплавильном процессе. М.: Металлургия, 1973. 312 с.
4. Сидоренко М.Ф. Теория и практика продувки металла порошками. М.: Металлургия, 1973. 303 с.
5. Bannenberg N., Lachmund H. Metallurgical procedures to achieve very low phosphorus contents // Revue metalurgie (Fr.). 91 (1994). №7–8. P. 1043–1054. V–VI.
6. Healy G.W. A new look on phosphorus distribution // Journal of The Iron and Steel Institute. 1970. Vol. 208. P. 664–668.
7. Развитие процесса дефосфорации стали в ковше на фирме NKK / Кикучи И., Такахаши К., Каваи И., Каваками К., Тенма Х., Тагучи К. // Инжекционная металлургия '83: сб. трудов / пер. В.К.Бабич и др.; ред. М.Ф.Сидоренко. М.: Металлургия, 1986. С. 67–78.
8. Такэси Н., Мицумото Х., Сиро М. Равновесное распределение фосфора между шлаками системы $\text{FeO-CaO-P}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2\text{-MgO}$ и жидким железом // Tetsu to hagane. 1985. 71. №12. P. 903.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

LADLE DEPHOSPHORIZATION OF LOW-CARBON STEEL SEMI-PRODUCT DURING THE PROCESSING OF IRON CONTAINING VANADIUM BY A FLUXLESS MONOPROCESS

Smirnov Leonid Andreevich – Academician of the Russian Academy of Sciences, D.Sc. (Eng.), Professor, Scientific Director of the Institute, Ural Institute of Metals, Ekaterinburg, Russia. Phone: +7(343)374 03 91. E-mail: uim@ural.ru.

Shulmin Dmitry Sergeevich – Postgraduate Student, Junior Researcher, Ural Institute of Metals, Ekaterinburg, Russia.

Smirnov Andrey Leonidovich – Senior Engineer, Ural Institute of Metals, Ekaterinburg, Russia.

Deryabin Yuriy Andreevich – D.Sc. (Eng.), Head of the Steelmaking Department, Uralgiprommez, Ekaterinburg, Russia. E-mail: info@uralgiprommez.ru.

Dovgolyuk Lyudmila Vasil'evna – Engineer, Ural Institute of Metals, Ekaterinburg, Russia. E-mail: uim@ural.ru.

Abstract. The study of the secondary dephosphorization processes of low-carbon steel semi-product was made. The treatment of metal by slag-forming mixture CaO-FeO-CaF_2 was carried out when tapping in the ladle. The possibility of obtaining a dephosphorization degree of about 50–60% at the initial phosphorus content in metal of 0.050–0.060% and a mixture flow of 3% by weight of metal was found. The optimum composition of dephosphorization slag was established: $\text{CaO} / \text{FeO} = 3.5\text{--}4.0$, $(\text{CaO}) \approx 70\text{--}75\%$, $(\text{FeO}) \approx 20\%$. The paper contains information about the perspectives of powder dephosphorization mixture blowing to increase a degree of metal dephosphorization up to 80–90% and achieve $[P]_{\text{final}} \leq 0.005\%$.

Keywords: fluxless monoprocess, ladle dephosphorization, solid slag mixture.

References

1. Smirnov L.A., Deryabin Yu.A., Dovgolyuk L.V. Vanadium behavior during blowing of vanadium hot iron. Report 2. *News of higher educational institutions. Ferrous Metallurgy*, 1979, no. 12, pp. 30–33.
2. Smirnov L.A., Rovnushkin V.A., Smirnov A.L. A new technological procedure of processing iron containing vanadium by fluxless BOF process. Collection of papers of the 13th International congress of steelmakers. City of Polevskoy, 12th–18th of October, 2014. Moscow – Polevskoy, 2014, pp. 143–147.
3. Ladyzhensky B.N. Using powder materials in steelmaking. Moscow: Metallurgy, 1973, 312 p.
4. Sidorenko M.F. Theory and practice of powder injection to metal. Moscow: Metallurgy, 1973, 303 p.
5. Bannenberg N., Lachmund H. Metallurgical procedures to achieve very low phosphorus contents. *Revue metalurgie* (Fr.), 91 (1994), no. 7–8, pp. 1043–1054, V–VI.
6. Healy G.W. A new look on phosphorus distribution. *Journal of The Iron and Steel Institute*, 1970, vol. 208, pp. 664–668.
7. Development of ladle steel dephosphorization in NKK / Kikuchi Y., Takahashi K., Kawai Y., Kavakami K., Tenma H., Taguchi K. *Injection Metallurgy*'83. Collection of papers. Translated by Babich V.K. et al., edited by Sidorenko M.F. Moscow: Metallurgy, 1986, pp. 67–78.
8. Takeshi N., Mitsumoto H., Siro M. The equilibrium distribution of phosphorus between $\text{FeO-CaO-P}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2\text{-MgO}$ slag system and liquid iron. *Tetsu-to-Hagane*, 1985, 71, no.12, p. 903.

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.771

МУЛЬТИМАСШТАБНОЕ КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Константинов Д.В., Корчунов А.Г.

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

Аннотация. В статье приведен обзор основных научных направлений в сфере компьютерного моделирования структурной композиции металла в ходе обработки. Выявлены основные достоинства и недостатки современных методов, рассмотрено их прикладное применение в различных сферах ОМД, обозначены ключевые направления развития и проблемы вопроса. Предложен метод реконструкции структуры металлов.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, микроструктура, обработка металлов давлением, репрезентативный объем.

Введение

Изменение параметров микроструктуры материала в процессах обработки металлов и сплавов давлением определяет конечные технологические и эксплуатационные свойства полупродукта и готовой продукции. Многочисленные исследования показывают, что изучение деформационных процессов, происходящих в металле, невозможно без перехода на микроуровень, так как именно параметры микроструктуры являются предельно емким «индикатором» технологических изменений в ходе обработки. При этом классические теории, базирующиеся только на механике сплошной среды, в силу принимаемых допущений могут обладать более низкой достоверностью прогноза относительно моделей с учетом микроструктурной репрезентации.

В свою очередь, распределение микроструктурных составляющих имеет двойственное технологическое значение. С одной стороны, исходная неравномерность распределения микроструктурных компонентов может привести к неравномерному ходу пластической деформации или структурно-фазовых превращений в ходе последующей обработки; с другой стороны, в ходе осуществления такой неравномерной обработки изначально неравномерное распределение микроструктуры может либо усугубиться, либо, наоборот, быть в определенной степени устранено. Данный момент является актуальным с позиции концепции технологической наследственности в прикладных исследованиях [1–3].

Современное состояние и перспективы развития моделирования процессов обработки металлов давлением

Современный этап развития методов моделирования процессов ОМД характеризуется появлением большого количества работ, в которых тем или иным способом предпринимаются попытки связать особенности строения материалов с характером их деформации [4–11]. В данных работах авторам удалось концептуально обозначить уровни протекания процессов пластической деформации и экспериментально связать явления локализации деформации с неравномерностью распределения микроструктурных параметров.

Также рассмотрение процессов ОМД с позиции микроструктурной анизотропии заготовки и ее последующей эволюции приведено в работах [10–12]. Анализ процесса волочения золотой проволоки с учетом несовершенств микроструктурной организации заготовки приведен в работе японских ученых [13]. В работе [14] приведены результаты изучения вопроса зависимости между микроструктурной неоднородностью проволоки и стабильностью процесса ее обработки давлением. Данные работы позволили оптимизировать действующие производственные технологии с позиции микроструктурной анизотропии материала. При этом ключевым инструментом в данном случае выступает компьютерное моделирование посредством современных программных комплексов.

Работы [15–18] посвящены разработке методик создания конечно-элементных моделей с воссозданием микроструктурной композиции на примере алюминиевых сплавов. Главным ре-

зультатом данных работ стало изучение напряженно-деформированного состояния в модели репрезентативного объема металла и сравнительный анализ полученного состояния с классической моделью изотропного материала. Предложенные авторами методики позволяют в предельной точности воссоздать реальную микроструктуру металла, наблюдаемую в ходе конкретных металлографических лабораторных исследований, при использовании относительно простых программных средств. Аналогичный метод получил развитие в исследованиях [19], в которых указанный способ был математически формализован. Однако следует отметить, что предложенные способы создания КЭ-моделей отличаются трудоемкостью процесса подготовки полученных в ходе металлографических исследований данных, многократно будут усложняться при моделировании микроструктурно более сложных металлов (например, двух-, трехфазные металлы или их модели с учетом металлических включений), а также не учитывают изменение микроструктурного строения металла и пространственной ориентации микроструктурных компонентов в ходе пластической деформации.

Принципиально другой способ представления в компьютерном моделировании микроструктурного строения металла предложен в работах [20–21], в которых построение неоднородного объема металла основывалось на использовании репрезентативного кубического объема со случайным распределением составляющих, характеризующихся их объемными долями. Геометрия микроструктурных составляющих была основана на простых геометрических элементах (пирамиды и конусы). Данная методика в сравнении с предыдущей является менее трудоемкой, но при этом позволяет строить 3D-модели исследуемых структур любой сложности и изучать напряженно-деформированное состояние отдельных структурных составляющих. При этом для многих материалов подобные допущения могут быть критичными с позиции достоверности прогноза поведения микроструктуры под технологическим воздействием.

В работах [22–23] предложен автоматизированный метод компьютерной репрезентации микроструктурного объема металла, который позволяет на основании тесного программного взаимодействия металлографического оборудования и CAD системы инженерного проектирования Unigraphics NX3 создать сверхточную, адаптированную для последующего конечно-элементного моделирования модель микроструктуры. Высокая точность результатов данной системы основывается на сложном реверс-

инжиниринговом математическом аппарате, включающем такие этапы обработки металлографических данных, как: фильтрация данных (уменьшение объема шумов), идентификация массива точек и вершин, NURBS-функция (неоднородный рациональный B-сплайн) и удаление объемных перекрытий структурных составляющих. При этом использование данного метода без наличия программной среды или соответствующего оборудования невозможно. Этот аспект становится особенно важным, например, при необходимости простого воссоздания микроструктуры металла из набора статистических данных, которые могут быть получены более простыми металлографическими методами.

Однако при исследовании НДС переход при моделировании исключительно на микроуровень (в отрыве от общего макросостояния деформируемого тела) может быть не только не показательным с позиции достоверности прогноза, но и вовсе не нести прикладного смысла. Поэтому в начале века зарождается идея двухуровневой концепции [24] исследования НДС, которая получила серьезное развитие в современной теории мультимасштабного моделирования в промышленной информатике.

Суть мультимасштабного компьютерного моделирования заключается в парном взаимодействии классической модели изотропной среды и модели репрезентативного объема (RVE, Representative Volume Element). Первая позволяет получить общие закономерности распределения НДС по всему объему деформируемого металла, а вторая – произвести анализ поведения конкретного точечного репрезентативного объема под воздействием такой макронагрузки (рис. 1).

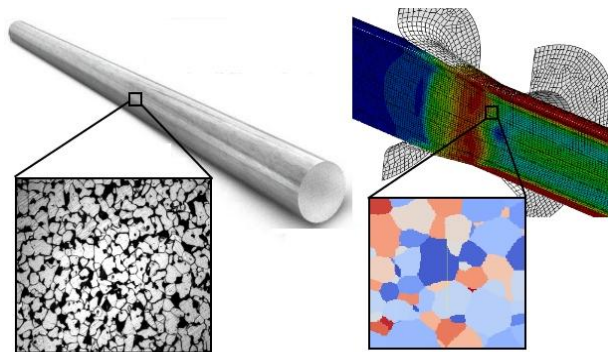


Рис. 1. Концептуальная схема мультимасштабного моделирования

В зависимости от масштабов воссоздаваемых элементов и специфики моделируемых процессов обработки для калькуляции подобных моделей могут использоваться самые различные математические методы: FE, XFE, CA, MD и их комбинации (рис. 2) [25].

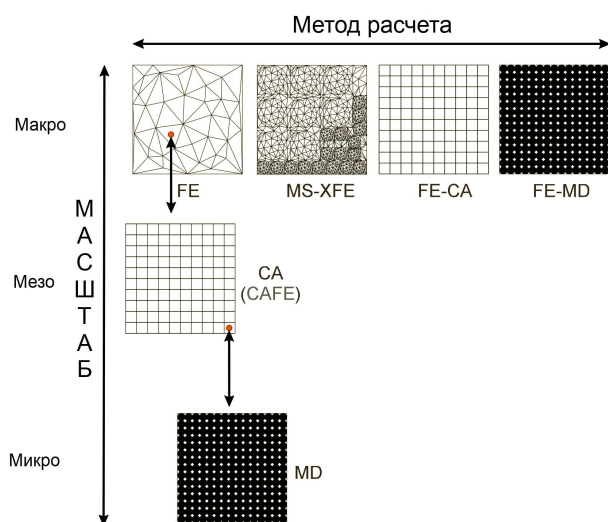


Рис. 2. Классификация мультимасштабных моделей

В работе [26] проводился анализ процессов инициализации разрушений различной природы на микроструктурном уровне в ходе моделирования реологических испытаний образцов нержавеющей стальной проволоки. По результатам работы был проведен сравнительный анализ экспериментальных данных, результатов моделирования на макроуровне и микроуровне. Результаты сравнения показали, что моделирование поведения материала на уровне микроструктуры позволяет более точно обнаружить момент инициализации микротрещины, что невозможно при моделировании изотропной среды.

В работе [27] проводился анализ поведения столбчатых структур под воздействием осевых напряжений и соотнесение его результатов с расчетной моделью изотропного образца, в результате чего статистически была продемонстрирована высокая предсказательная способность модели с микроструктурной репрезентативной составляющей.

В работах [28–30] на основе мультимасштабного моделирования была обоснована его перспективная роль для изучения процессов измельчения аустенита и выявления закономерностей его поведения при легировании.

Также двухуровневая концепция была успешно апробирована при исследовании поврежденности бетонных панелей, армированных микрофиброй [31–32]. Переход на микроструктурный репрезентативный уровень в компьютерном моделировании осесимметричной нагрузки бетона при сравнительном анализе с данными физического моделирования позволил повысить достоверность прогнозирования момента наступления первого разрушения в 7 раз.

Мультимасштабное моделирование, реализованное посредством совмещенного метода кле-

точных автоматов и конечных элементов [33–34], позволило численно формализовать механизм распада аустенита и поведение стали типа DP при различных технологических режимах термомеханической обработки.

В работе [35] было изучено поведение наноструктурированной двухфазной стальной микроструктуры. Сравнительный анализ прогноза расчетной модели и экспериментальных данных показал крайне высокую степень достоверности.

Таким образом, современная методология проектирования технологических процессов с позиции создания НДС, благоприятного для достижения технологических целей, обязана учитывать преобразования на микроуровне обрабатываемого металла, но при этом исключительно в парном взаимодействии с макроуровнем.

Особенно остро данный нюанс проявляется при технологических процессах обработки металлов давлением (ОМД) с заведомо высокой степенью неравномерности.

Примером такого процесса может являться однократное волочение с малыми обжатиями (калибрование) горячекатаной заготовки (диапазон размеров от 5 до 40 мм и более) после предварительного травления или механической очистки поверхности. Данный вид продукции имеет важное значение для отечественной и зарубежной машиностроительной, военной и автомобильной промышленности. Конечными продуктами в данном случае становятся различного рода оси, валы и стержневые конструкции, которые должны подвергаться циклическим и статическим нагрузкам в ходе всего периода эксплуатации. По этой причине неравномерность механических свойств вследствие неравномерности деформации является критическим моментом в оценке потенциальной эксплуатационной надежности готовой продукции.

Немаловажным аспектом данного технологического процесса являются применяемые материалы. В отечественной промышленности наибольшую часть производственных объемов занимает продукция из классических низко- и среднеуглеродистых марок сталей, которые обладают достаточно простым микроструктурным строением (как правило, это различные процентные соотношения двух структурных составляющих). В зарубежной промышленности номенклатура материалов более широка и включает в себя такие современные материалы, как TRIP, TWIP и DP стали [36–41], которые обладают более высокой технологической гибкостью благодаря сложной метастабильной микроструктуре. Например, в ходе обработки TRIP сталей остаточный аустенит превращается в мартенсит, вследствие чего данные стали приобретают одновременно повышенную пластичность и прочность (относительно рядовых конструкционных и низколегированных сталей). Таким образом, при-

обрабатываемая при обработке давлением неравномерность деформации потенциально может привести к относительно высокой разнице механических свойств в различных частях обрабатываемого материала вследствие различного количества преобразованных структурных элементов. При этом стоит отметить, что моделирование процессов деформационной обработки на макроуровне никак не учитывает сложное поведение микроструктуры таких сталей, а использует лишь кривые упрочнения, которые не отображают общей природы происходящих в этих сталях изменений. Поэтому обоснованным является гипотеза о том, что НДС на микроуровне таких сталей будет обладать численным уровнем и распределением, отличными от макроуровня, а следовательно, это позволит повысить степень достоверности прогноза конечных механических свойств металла.

Основной проблемой создания модели микроструктуры любого материала является его удельное количество структурных составляющих на единицу микрообъема. Структурные составляющие расположены в материале хаотично, но при этом имеют определенные ограничения по размеру, базовой форме и общей ориентировке в пространстве. Ручное создание подобной геометрической модели – сверхтрудоемкая задача, поэтому очевидным решением данной проблемы является использование статистически-вероятностных математических методов. Так, построение такой геометрической модели было автоматизировано за счет использования классических методов Монте-Карло, которые основаны на многоповторных циклах реализации случайного процесса. При этом сам циклически повторяемый процесс или функция создавался таким образом, чтобы результат от его реализации совпадал с аналогичными величинами решаемой задачи. Таким образом, результаты материаловедческих исследований (средний размер зерна, геометрические параметры его пространственной ориентировки и т.д.) могут выступать в качестве вероятностных характеристик решаемой задачи.

Дополнив данную модель топографией, созданной на основе функционалов Минковского, в результате получили геометрический объем, заполненный случайно ориентированными в пространстве элементарными объемными геометрическими фигурами (эллипсоиды, супер эллипсоиды, октаэдры и т.д.). После этого посредством корректировочных итераций исключили из всех созданных геометрических фигур перекрытые части объемов.

При этом в качестве ограничений, включенных в вероятностные характеристики решаемой задачи, могут выступать и данные о пространственной ориентации структурных составляющих, полученные в ходе таких современных ме-

тодов металлографического анализа, как дифракция отраженных электронов (EBSD-анализ).

Так, для апробации предлагаемого способа создания RVE [42] была выбрана сталь 20, фотография микрошлифа которой приведена на рис. 3.

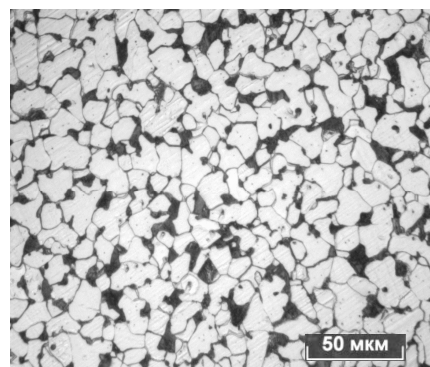


Рис. 3. Изображение микроструктуры, полученное посредством металлографических исследований

В качестве данных использовали эмпирически полученные размеры зерен. Размер репрезентативного объема был выбран из соображений максимального использования аппаратных мощностей расчетной машины (Intel i7, 10Gb RAM) – 700x700x700 вокселей. Количество итераций – 1000000. При этом следует отметить тот факт, что подавляющее большинство зарубежных исследовательских центров используют для расчетных работ кластерные компьютерные станции и суперкомпьютеры (например, комплекс Cyfronet Горно-металлургической академии им. Станислава Сташица в Кракове, Польша).

В результате были получены геометрические модели стали 20, представленные на рис. 4.

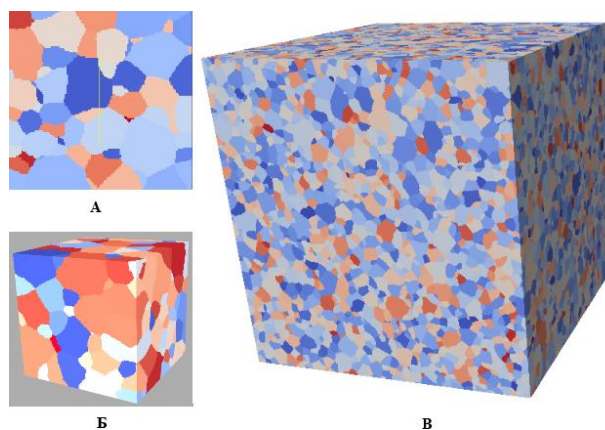


Рис. 4. Репрезентация реальной структуры стали 20: А – 2D-модель структуры стали 20; Б – 3D-модель структуры стали 20 (3300 зерен); В – 3D-модель структуры стали 20 (41798 зерен)

Таким образом, при наличии статистической информации о размерных параметрах микроструктуры становится возможным построение

как 2D, так и 3D модели изучаемой структуры. Однако при наличии возможности такого металлографического исследования, как EBSD-анализ эти модели могут быть уточнены посредством метода реверс-инжиниринга.

Полученные модели могут быть адаптированы для конечно-элементного моделирования в современных программных продуктах, что позволит оценивать напряженно-деформированное состояние на микроуровне обрабатываемого металла. Следовательно, использование данного метода микроструктурной репрезентации металла открывает перспективы исследования изменения ориентации микроструктурных составляющих в ходе пластической деформации.

Заключение

Развитие методов компьютерного моделирования структурного строения металлических материалов является крайне актуальной задачей. При этом наметилась тенденция к максимальному приближению результатов моделирования микроструктуры к реальности за счет совершенствования методологии и принципов создания геометрических моделей структур. Однако подавляющее большинство описанных в литературе методов компьютерной структурной репрезентации отличаются высокой трудоемкостью процесса воссоздания стохастически распределенных в объеме металла структурных элементов. Следовательно, дальнейшее развитие данного направления в компьютерном моделировании должно быть направлено на автоматизацию и упрощение процесса создания мультимасштабных моделей при сохранении высокого уровня их репрезентативной точности. В настоящей работе был предложен относительно простой метод построения геометрических моделей репрезентативных структурных объемов для последующего конечно-элементного моделирования напряженно-деформированного состояния обрабатываемого металла. Предложенный метод лишен ключевых недостатков современных методов структурной репрезентации, а именно позволяет воспроизводить структуры как из статистических данных о размерных параметрах микроструктуры, так и из результатов более сложных металлографических исследований, причем с относительно низкой трудоемкостью. Подобный подход к моделированию структуры металла, в свою очередь, может повысить степень достоверности прогноза зависящих от параметров микроструктуры механических свойств и градиента их распределения по объему заготовки.

Список литературы

1. Анализ метода непрерывного деформационного наноструктурирования проволоки с использованием концепции технологического наследования / Чукин М.В., Корчунов А.Г., Полякова М.А., Гулин А.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. № 4. С. 61-65.
2. Управление качеством продукции в технологиях метизного производства / Корчунов А.Г., Чукин М.В., Гун Г.С., Полякова М.А. М.: Издательский дом «Руда и Металлы», 2012. 164 с.
3. Technological Inherited Connections in Continuous Method of Deformational Nanostructuring / Корчунов А.Г., Полякова М.А., Гулин А.В., Константинов Д.В. // Applied Mechanics and Materials Vol. 555 © (2014) Trans Tech Publications Switzerland, pp. 401–405. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.555.401
4. Кукса Л.В., Евдокимов Е.Е. Разработка конечно-элементной модели и метода расчета элементов конструкций из структурно-неоднородных материалов с факторами концентрации напряжений // Изв. вузов. Строительство. 2002. № 5. С.16–21.
5. Панин В.Е., Гриняев Ю.В., Данилов В.И. Структурные уровни пластической деформации и разрушения. Новосибирск: Наука, 1990. 252 с.
6. Пашков П.О. Разрыв металлов. Л.: Судпромгиз, 1960. 243 с.
7. Писаренко Г.С., Лебедев А.А. Деформирование и прочность материала при сложном напряженном состоянии. Киев: Наук. думка, 1976. 415 с.
8. Рыбалко Ф.П. Распределение неоднородностей пластической деформации // Изв. вузов. Физика. 1959. № 1. С. 6–14.
9. Фридман Я.Б., Зилова Т.К., Демина Н.И. Изучение пластической деформации и разрушения методом катанных сеток. М.: Оборонгиз, 1962. 188 с.
10. Microstructure and texture evolution of cold drawing <110> single crystal copper / Chen Jian, Yan Wen, Li Bing, Ma XiaoGuang, Du XinZhi & Fan XinHui // Science China. Technological Sciences. June 2011, vol. 54, no. 6, pp. 1551–1559.
11. Strain path and microstructure evolution during severe deformation processing of an as-cast hypoeutectic Al–Si alloy / J.M. Garcia-Infanta, A.P. Zhilyaev, F. Carreno, O.A. Ruano, J.Q. Su, S.K. Menon, T.R. McNelley // Ultrafine grained materials. J Mater Sci (2010) 45, pp. 4613–4620.
12. Mechanical Behavior and Microstructural Development of Low-Carbon Steel and Microcomposite Steel Reinforcement Bars Deformed under Quasi-Static and Dynamic Shear Loading / J. Dougherty, E.K. Cerreta, G.T. Gray III, C.P. Trujillo, M.F. Lopez, K.S. Vecchio, and G.J. Kusinski // Ultrafine grained materials. J Mater Sci (2010) 45, pp. 4500–4503.
13. Prevention of Wire Breaks in Gold Fine Wire Drawing and Improvement in Wire Straightening / K.Yoshida, T.Yamashita, A.Tanaka // Bulk Metal Forming-steel research int. 2011, Special Edition.
14. Relationship between microstructure homogeneity and bonding stability of ultrafine gold wire / Seoung-Bum Son, Hyunshul Roh, Suk Hoon Kang // Ultrafine grained materials. J Mater Sci (2010) 45, pp. 236–244.
15. Компьютерное моделирование процесса вытяжки полых стержней из сплава амгб с учетом реальной структуры материала / Бунова Г.З., Воронин С.В., Гречников Ф.В., Юшин В.Д. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2009. Т. 11. № 3-1. С. 219–224.
16. Воронин С.В., Юшин В.Д., Бунова Г.З. Компьютерное моделирование процесса прокатки сплава амгб с учетом его анизотропии // Изв. вузов. Авиационная техника. 2008. № 4. С. 72–73.
17. Computer-aided simulation of the amg6 alloy rolling process with allowance for its anisotropy / Voronin S.V., Yushin V.D., Bunova G.Z. // Russian Aeronautics. 2008. Т. 51. № 4. С. 457–460.
18. Воронин С.В., Бунова Г.З., Юшин В.Д. Компьютерное исследование влияния реальной структуры материалов на характер распространения трещин в хрупких анизотропных телах // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2006. № 4. С. 72–77.

19. A mesoscale cellular automaton model for curvature-driven grain growth / Y.J. Lan, D.Z. Li, Y.Y. Li // *Metallurgical and Materials Transactions B* February 2006, vol. 37, iss. 1, pp. 119–129.
20. Гук С.В., Смирнов О.М., Кавалла Р. Неравномерность деформации компонентов микроструктуры многофазных сталей при оценке предельной формовости листового металла // *Металлург.* 2006. № 5. С. 29–32.
21. Microstructure strain localization during sheet metal hydroforming processes / S. Guk, R. Kawalla // *In steel research international* 76, №12 (2005), pp. 843–851.
22. 3D polycrystalline microstructure reconstruction from FIB generated serial sections for FE analysis/ Y. Bhandari, S. Sarkar, M. Groeber, M.D. Uchic, D.M. Dimiduk, S. Ghosh // *Computational Materials Science* 41 (2007), pp. 222–235.
23. CAD-based reconstruction of 3D polycrystalline alloy microstructures from FIB generated serial sections/ S. Ghosh, Y. Bhandari, M. Groeber // *Computer-Aided Design* 40 (2008), pp. 293–310.
24. Солошенко А.Н. Разработка метода моделирования напряженно-деформированного состояния при обработке давлением структурно-неоднородных материалов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05 / Солошенко Алексей Николаевич. Екатеринбург, 2000. 19 с.
25. Finite Element Simulations of Cold Deformation at the Mesoscale / G.B. Sarma, B. Radhakrishnan, and T. Zacharia // *Comp Mater Sci.*, 12 (2) (1998), pp. 105–123.
26. Multiscale Modeling of Phase Transformations in Steels / M. Militzer, J.J. Hoyt, N. Provatas, J. Rottler, C.W. Sinclair, and H.S. Zurob // *JOM*, 2014 The Minerals, Metals & Materials Society, pp. 19–26. doi: 10.1007/s11837-014-0919-x
27. Grain-Scale Modeling Approaches for Polycrystalline Aggregates / Igor Simonovski and Leon Cizelj // *Polycrystalline Materials - Theoretical and Practical Aspects*, InTech 2012, pp. 49–74.
28. The complex computer system based on cellular automata method designed to support modelling of laminar cooling processes / Rafal Golab, Lukasz Madej, Maciej Pietrzyk // *Journal of Machine Engineering*, vol. 14, no.1, 2014, pp. 63–73.
29. Simulation of polycrystal deformation with grain and grain boundary effects / H. Lim, M.G. Lee, J.H. Kim, B.L. Adams, R.H. Wagoner // *International Journal of Plasticity* 27 (2011) 1328–1354.
30. Overview of constitutive laws, kinematics, homogenization and multiscale methods in crystal plasticity finite-element modeling: Theory, experiments, applications / F. Roters, P. Eisenlohr, L. Hantcherli, D.D. Tjahjanto, T.R. Bieler, D. Raabe // *Acta Materialia* 58 (2010), pp. 1152–1211.
31. Experimental investigation and multiscale modeling of ultra-highperformance concrete panels subject to blast loading / B.D. Ellis, B.P. DiPaolo, D.L. McDowell, M. Zhou // *International Journal of Impact Engineering* 69 (2014), pp. 95–103.
32. Multiscale failure analysis of fiber reinforced concrete based on a discrete crack model / Guillermo Etse, Antonio Caggiano, Sonia Vrech // *Int J Fract* (2012) 178, pp. 131–146. doi: 10.1007/s10704-012-9733-z
33. Conventional and Multiscale Modeling of Microstructure Evolution During Laminar Cooling of DP Steel Strips / Maciej Pietrzyk, Jan Kusiak, Roman Kuziak, Łukasz Madej, Danuta Szeliga, and Rafał Golab // *Metallurgical and materials transactions*, 2014, pp. 17–34.
34. From High Accuracy to High Efficiency in Simulations of Processing of Dual-Phase Steels / L. Rauch, R. Kuziak, and M. Pietrzyk // *Metallurgical and materials transactions volume 45b*, APRIL 2014, pp. 497–506. doi: 10.1007/s11663-013-9926-5
35. Multiscale prediction of mechanical behavior of ferrite-pearlite steel with numerical material testing / I. Watanabe¹, D. Setoyama, N. Nagasako, N. Iwata and K. Nakanishi // *International journal for numerical methods in engineering* Int. J. Numer. Meth. Engng 2012; 89:pp. 829–845 Published online 12 August 2011 in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com). doi: 10.1002/nme.3264
36. Wokreślenie parametrów dwustopniowej obróbki cieplnej zapewniających uzyskanie w strukturze końcowej niskowęglowej stali maksymalnej ilości austenitu szcążkowego decydującego o efekcie TRIP / Wiewiórowska S. // *Hutnik-Wiadomości-Hutnicze*, 76, 2009, pp. 122–125.
37. On application of shape coefficients to creation of the statistically similar representative element of DP steels/ Rauch Ł., Pernach M., Bzowski K., Pietrzyk M. // *Computer Methods in Materials Science*, 11, 2011, pp. 531–541.
38. Numerical investigation of influence of the martensite volume fraction on DP steels fracture behavior on the basis of digital material representation model / Muszka K., Madej Ł., Graca P., Perzynski K., Sun L., Palmiere E. // *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2014, pp. 11–17.
39. Influence of the strain rate on the strain-induced transformation of retained austenite to martensite in high strength low alloy TRIP steels / Wei X.C., Li L., Fu R.Y., De Cooman B.C., Wollants P., Zhu X.D., Wang L. //, *Int. Conf. on TRIP-Aided High Strength Ferrous Alloys*, 2002, pp. 367–371.
40. Determination of content of retained austenite in steels with TRIP effect deformed at different strain rates / Wiewiórowska S. // *Steel Research International*, 81, 2010, spec. issue conf. Metal Forming, pp. 262–265.
41. The influence of strain rate and strain intensity on retained austenite content in structure of steel with TRIP Effect/ Wiewiórowska S. // *Solid State Phenomena* 165, 2010, pp. 216–220.
42. Константинов Д.В., Корчунов А.Г. Современные подходы к представлению микроструктуры при моделировании процессов ОМД // *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. 49–55.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

MULTI-SCALE COMPUTER SIMULATION OF METAL FORMING PROCESSES

Konstantinov Dmitry Vyacheslavovich – Postgraduate Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia.

Korchunov Alexey Georgievich – D.Sc. (Eng.), Professor, Vice-Rector for International Affairs, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. E-mail: international@magtu.ru.

Abstract. This article presents an overview of the main research directions in the field of computer simulation of the metal microstructure composition during processing. Main advantages and disadvantages of modern methods have been identified, their applications in various fields of metal forming were reviewed, the key development directions and problems were designated. A metal structure reconstruction method was proposed.

Keywords: computer simulation, microstructure, metal forming, representative volume.

References

1. Chukin M.V., Korchunov A.G., Polyakova M.A., Gulin A.V. Analiz metoda nepreryvnogo deformatsionnogo nanostrukturirovaniya provoloki s ispolzovaniem kontsepcii tekhnologicheskogo nasledovaniya. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2012, no. 4, pp. 61–65.

2. Korchunov A.G., Chukin M.V., Gun G.S., Polyakova M.A. *Upravlenie kachestvom produktii v tekhnologiyakh metiznogo proizvodstva* [Products quality management in metalware production processes]. Moscow: Ruda i Metally, 2012, 164 p.
3. Korchunov A.G., Polyakova M.A., Gulina A.V., Konstantinov D.V. Technological Inherited Connections in Continuous Method of Deformational Nanostructuring. *Applied Mechanics and Materials*. Vol. 555 (2014), pp. 401-405. © (2014) Trans Tech Publications, Switzerland doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.555.401
4. Kuksa L.V., Evdokimov E.E. Razrabotka konechno-elementnoy modeli i metoda rascheta elementov konstruksii iz strukturno-neodnorodnykh materialov s faktorami kontsentratsii napryazheniuy. *Izvestiya vuzov. Stroitelstvo*. [News of higher educational institutions. Construction]. 2002, no. 5, pp. 16-21.
5. Panin V.E., Grinyayev Yu.V., Danilov V.I. *Strukturnye urovni plasticheskoy deformatsii i razrusheniya* [Structural levels of yield strain and fracture]. Novosibirsk: Nauka, 1990, 252 p.
6. Pashkov P.O. *Razryv metallov* [Fracture of metals]. Leningrad: Sudpromgiz, 1960, 243 p.
7. Pisarenko G.S., Lebedev A.A. *Deformirovanie i prochnost materiala pri slozhnom napryazhennom sostoyanii* [Metal deformation and strength at combined stress]. Kiev: Naukova dumka, 1976, 415 p.
8. Rybalko F.P. Raspredelenie neodnorodnostey plasticheskoy deformatsii [Distribution of non-uniformities of plastic deformation]. *Izvestiya vuzov. Fizika* [News of higher educational institutions. Physics]. 1959, no. 1, pp. 6-14.
9. Fridman Ya.B., Zilova T.K., Demina N.I. *Izuchenie plasticheskoy deformatsii i razrusheniya metodom katannykh setok* [Study of plastic deformation and fracture by a rolled grid method]. Moscow: Oborongiz, 1962, 188 p.
10. Chen Jian, Yan Wen, Li Bing, Ma XiaoGuang, Du XinZhi & Fan XinHui Microstructure and texture evolution of cold drawing <110> single crystal copper. *Science China. Technological Sciences*, June 2011, vol.54, no.6, pp. 1551-1559.
11. Garcia-Infanta J.M., Zhilyayev A.P., Carreno F., Ruano O.A., Su J.Q., Menon S.K., McNeelley T.R. Strain path and microstructure evolution during severe deformation processing of an as-cast hypoeutectic Al-Si alloy. Ultrafine grained materials. *J Mater Sci* (2010) 45, pp. 4613-4620.
12. Dougherty J., Cerreta E.K., Gray III G.T., Trujillo C.P., Lopez M.F., Vecchio K.S., and Kusinski G.J. Mechanical Behavior and Microstructural Development of Low-Carbon Steel and Microcomposite Steel Reinforcement Bars Deformed under Quasi-Static and Dynamic Shear Loading. Ultrafine grained materials. *J Mater Sci* (2010) 45, pp. 4500-4503.
13. Yoshida K., Yamashita T., Tanaka A. Prevention of Wire Breaks in Gold Fine Wire Drawing and Improvement in Wire Straightening. *Bulk Metal Forming-steel research int.* 2011, Special Edition.
14. Seoung-Bum Son, Hyunshul Roh, Suk Hoon Kang. Relationship between microstructure homogeneity and bonding stability of ultrafine gold wire. Ultrafine grained materials. *J Mater Sci* (2010) 45, pp. 236-244.
15. Bunova G.Z., Voronin S.V., Grechnikov F.V., Yushin V.D. Kompyuternoe modelirovanie protsessa vytyazhki polykh stakanichkov iz splava amg6 s uchedom realnoy struktury materiala. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk [Proceedings of the Samara Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences]*. 2009, vol. 11, no. 3-1. pp. 219-224.
16. Voronin S.V., Yushin V.D., Bunova G.Z. Kompyuternoe modelirovanie protsessa prokatki splava amg6 s uchedom ego anizotropii. *Izvestiya vysshix uchebnykh zavedenij. Aviacionnaya texnika* [News of higher educational institutions. Aircraft Engineering]. 2008, no. 4, pp. 72-73.
17. Voronin S.V., Yushin V.D., Bunova G.Z. Computer-aided simulation of the amg6 alloy rolling process with allowance for its anisotropy. *Russian Aeronautics*, 2008, vol. 51, no. 4, pp. 457-460.
18. Voronin S.V., Bunova G.Z., Yushin V.D. Kompyuternoe issledovanie vliyaniya realnoy struktury materialov na kharakter rasprostraneniya treshchin v khrupkikh anizotropnykh telakh [A computer-aided study of how a real structure of materials influences a character of crack propagation in brittle anisotropic bodies]. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii* [Problems of mechanical engineering and automation]. 2006, no. 4, pp. 72-77.
19. Lan Y.J., Li D.Z., Li Y.Y. A mesoscale cellular automaton model for curvature-driven grain growth. *Metallurgical and Materials Transactions B*, February 2006, vol. 37, iss. 1, pp. 119-129.
20. Guk S.V., Smirnov O.M., Kavalla R. Neravnomernost deformatsii komponentov mikrostruktury mnogofaznykh staley pri otsenke predelnoy formuemosti listovogo metalla [Unhomogeneity of deformation of multiphase steel microstructure components when evaluating limit formability of sheets]. *Metallurg* [Metallurgist]. 2006, no. 5, pp. 29-32.
21. Guk S., Kawalla R. Microstructure strain localization during sheet metal hydroforming processes. *Steel research international* 76, no. 12 (2005), pp. 843-851.
22. Bhandari Y., Sarkar S., Groeber M., Uchic M.D., Dimiduk D.M., Ghosh S. 3D polycrystalline microstructure reconstruction from FIB generated serial sections for FE analysis. *Computational Materials Science* 41 (2007), pp. 222-235.
23. Ghosh S., Bhandari Y., Groeber M. CAD-based reconstruction of 3D polycrystalline alloy microstructures from FIB generated serial sections. *Computer-Aided Design* 40 (2008), pp. 293-310.
24. Soloshenko A.N. *Razrabotka metoda modelirovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya pri obrabotke davleniem strukturno-neodnorodnykh materialov: avtoreferat dissertatsii po metallurgii, 05.16.05*. [Development of a simulation method for a strain-deformation state when forming structurally inhomogeneous materials: extended abstract Ph.D. dissertation]. Yekaterinburg, 2000, 19 p.
25. Sarma G.B., Radhakrishnan B., and Zacharia T. Finite Element Simulations of Cold Deformation at the Mesoscale. *Comp Mater Sci.* 12 (2) (1998), pp. 105-123.
26. Militzer M., Hoyt J.J., Provatas N., Rottler J., Sinclair C.W., and Zurob H.S. Multiscale Modeling of Phase Transformations in Steels. *JOM*, 2014. The Minerals, Metals & Materials Society, pp. 19-26. doi: 10.1007/s11837-014-0919-x.
27. Igor Simonovski and Leon Cizelj. Grain-Scale Modeling Approaches for Polycrystalline Aggregates. *Polycrystalline Materials - Theoretical and Practical Aspects*, InTech 2012, pp. 49-74.
28. Rafal Golab, Lukasz Madej, Maciej Pietrzyk. The complex computer system based on cellular automata method designed to support modelling of laminar cooling processes. *Journal of Machine Engineering*, vol. 14, no.1, 2014, pp. 63-73.
29. Lim H., Lee M.G., Kim J.H., Adams B.L., Wagoner R.H. Simulation of polycrystal deformation with grain and grain boundary effects. *International Journal of Plasticity* 27 (2011), pp. 1328-1354.
30. Roters F., Eisenlohr P., Hantcherli L., Tjahjanto D.D., Bieler T.R., Raabe D. Overview of constitutive laws, kinematics, homogenization and multiscale methods in crystal plasticity finite-element modeling: Theory, experiments, applications. *Acta Materialia* 58 (2010), pp. 1152-1211.
31. Ellis B.D., DiPaolo B.P., McDowell D.L., Zhou M. Experimental investigation and multiscale modeling of ultra-highperformance concrete panels subject to blast loading. *International Journal of Impact Engineering* 69 (2014), pp. 95-103.
32. Guillermo Etse, Antonio Caggiano, Sonia Vrech. Multiscale failure analysis of fiber reinforced concrete based on a discrete crack model. *Int J Fract* (2012) 178, pp. 131-146. doi: 10.1007/s10704-012-9733-z.
33. Pietrzyk Maciej, Kusiak Jan, Kusiak Roman, Madej Łukasz, Szeli-ga Danuta, and Golab Rafał. Conventional and Multiscale Modeling of Microstructure Evolution During Laminar Cooling of DP Steel Strips. *Metallurgical and materials transactions*, 2014, pp. 17-34.
34. Rauch L., Kuziak R., and Pietrzyk M. From High Accuracy to High Efficiency in Simulations of Processing of Dual-Phase Steels. *Metallurgical and materials transactions volume 45b*, APRIL 2014, pp. 497-506. doi: 10.1007/s11663-013-9926-5.
35. Watanabel I., Setoyama D., Nagasako N., Iwata N. and Nakanishi K. Multiscale prediction of mechanical behavior of ferrite-pearlite

- steel with numerical material testing. International journal for numerical methods in engineering 2012; 89, pp. 829–845. Published online on 12 August 2011 in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com). doi: 10.1002/nme.3264
36. Wiewiórska S. Określenie parametrów dwustopniowej obróbki cieplnej zapewniających uzyskanie w strukturze końcowej niskowęglowej stali maksymalnej ilości austenitu szczytkowego decydującego o efekcie TRIP. *Hutnik-Wiadomości-Hutnicze*, 76, 2009, pp. 122-125.
37. Rauch Ł., Pernach M., Bzowski K., Pietrzyk M. On application of shape coefficients to creation of the statistically similar representative element of DP steels. *Computer Methods in Materials Science*, 11, 2011, pp. 531-541.
38. Muszka K., Madej Ł., Graca P., Perzynski K., Sun L., Palmiere E. Numerical investigation of influence of the martensite volume fraction on DP steels fracture behavior on the basis of digital material representation model. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2014, pp. 11-17.
39. Wei X.C., Li L., Fu R.Y., De Cooman B.C., Wollants P., Zhu X.D., Wang L. Influence of the strain rate on the strain-induced transformation of retained austenite to martensite in high strength low alloy TRIP steels. *Int. Conf. on TRIP-Aided High Strength Ferrous Alloys*, 2002, pp. 367-371.
40. Wiewiórska S. Determination of content of retained austenite in steels with TRIP effect deformed at different strain rates. *Steel Research International*, 81, 2010, spec. issue conf. Metal Forming, pp. 262-265.
41. Wiewiórska S. The influence of strain rate and strain intensity on retained austenite content in structure of steel with TRIP Effect. *Solid State Phenomena* 165, 2010, pp. 216-220.
42. Konstantinov D.V., Korchunov A.G. *Sovremennye podkhody k predstavleniyu mikrostruktury pri modelirovanii protsessov OMD* [Modern approaches to microstructure representation when simulating metal forming processes: international collection of research papers, edited by V.M. Salganik]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2014, iss. 20, pp. 49-55.

УДК 669.017.1 + 621.78 : 669.14

К ВОПРОСУ ВЫБОРА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФУНКЦИИ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ДЛЯ ОПИСАНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛИ 20 В ПРОЦЕССЕ ГОРЯЧЕЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ *

Ишимов А.С., Барышников М.П., Чукин М.В.

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

Аннотация. Исследовано деформационное поведение стали 20 в условиях одноосного изотермического сжатия с использованием комплекса физического моделирования Gleeble 3500 в диапазоне температур 1000–1200°C и скоростей деформации 0,1–1 с⁻¹. На кривых текучести отмечены критические точки и участки, соответствующие основным этапам процесса горячей деформации: динамическое упрочнение, динамический возврат, динамическая рекристаллизация. Проведен сравнительный анализ математических функций, позволяющих описать реологические свойства стали 20. Определены численные значения энергии активации (Q) и параметра Зинера-Холломоуна (Z). Определены уравнения состояния стали 20.

Ключевые слова: динамическая рекристаллизация, Gleeble 3500, горячая деформация, реологические свойства, параметр Зинера-Холломоуна, сопротивление деформации.

Введение

В настоящее время моделирование методом конечных элементов (МКЭ) получило большое распространение в качестве математического инструментария для исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) в процессах обработки металлов давлением. На сегодняшний день МКЭ реализован в различных программных

комплексах, таких как Symulia Abaqus, Deform2D/3D, QForm, Ansis, Forge 3D и др. [1]. Для корректной постановки задачи, а следовательно, и адекватности получаемых результатов расчетов, в данных программных комплексах, необходимо задать точное описание реологических свойств исследуемого материала [19]. В связи с этим, наличие математической модели, описывающей реологические свойства материала для различных условий деформирования, является актуальной с практической и научной точек зрения задачей.

Условия деформирования оказывают значительное влияние на энергосиловые параметры процесса, микроструктуру и механические свойства готовой продукции. В процессах обработки металлов давлением для оценки напряженно-деформированного состояния, энергосиловых параметров важной характеристикой является сопротивление деформации. На величину сопро-

* Работа выполнена в соответствии с государственным заданием Министерства образования и науки Российской Федерации Магнитогорскому государственному техническому университету им. Г. И. Носова по теме «Разработка технологии получения высокопрочных длинномерных профилей из материалов с ультрамелкозернистой структурой в условиях комбинирования процессов интенсивного пластического деформирования» (Задание № 11.1525K от 18 июля 2014 г.).

Работа проведена в рамках реализации комплексного проекта при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по созданию высокотехнологичного производства, выполняемого с участием российского высшего учебного заведения (Договор 02.G25.31.0105).

тивления деформации оказывают влияние различные факторы, такие как химический состав деформируемого металла, температура, скорость, степень деформации, условия контакта на границе обрабатываемый металл – инструмент и др. Наиболее существенно комплексное влияние перечисленных факторов проявляется в процессах горячей пластической деформации.

Существует множество математических моделей [1–17], отражающих зависимость сопротивления деформации металлов от условий деформирования в горячем состоянии. Данные модели включают в себя физические закономерности деформационного поведения металлов, основанные на элементах теории термодинамики, кинетики движения и скольжения дислокаций. В отличие от данных, получаемых в результате единичных испытаний при простых схемах нагружения (одноосное растяжение, сжатие, кручение и т.д.), такие модели позволяют получить описание реологических свойств металла в большом диапазоне условий деформирования. При этом, математические модели получают на основании экспериментальных данных путем построения кривых (диаграмм) текучести, типичный вид которых представлен на рис. 1. На этом рисунке отражены основные этапы процесса горячей деформации металла и основные критические точки.

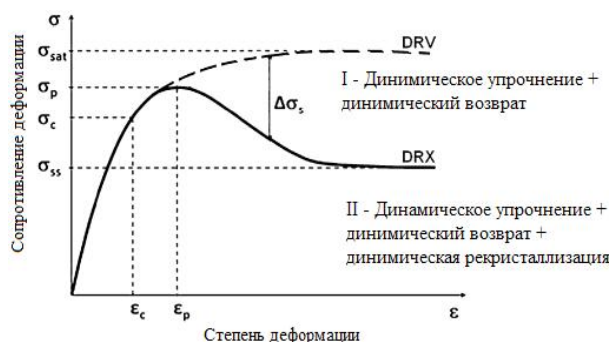


Рис.1. Схематическое изображение кривой текучести в процессе горячей деформации с условных изображением 2 возможных вариантов разупрочнения

При выводе математических моделей сопротивления деформации исследователи используют различные методики расчета. В работах [1–7] применяется метод описания реологических свойств металла при помощи параметра Зинера-Холломона. В этом случае падение сопротивления деформации $\Delta\sigma_s$ при протекании процесса динамической рекристаллизации рассчитывается на основании определения доли динамической рекристаллизации (доли рекристаллизованной структуры). В работах [8–12] изменение реологических свойств металла описывают в зависимости от степени деформации. В данных работах получены

степенные уравнения, связывающие значения констант материала со степенью деформации. В работе [13] реологические свойства стали определяют при помощи описания кривой текучести полиномиальной зависимостью и выражения основных точек $(\varepsilon_p, \sigma_p)$ диаграммы текучести через параметр Зинера-Холломона. В этой же работе реологические свойства описываются при помощи нейронной сети. В работах [14–17] процесс деформационного упрочнения описан с точки зрения изменения плотности дислокаций.

Во всех работах, указанных выше, уравнения состояния вида $\sigma = f(T, \dot{\varepsilon}, \varepsilon)$ представляют собой функцию гиперболического синуса, однако не приводятся обоснования для использования данной функции и ее преимущества по сравнению с другими зависимостями.

В этой связи, целью представляемого далее исследования является сравнительный анализ математических зависимостей, позволяющих рассчитать значение сопротивления деформации для описания реологических свойств низкоуглеродистой стали 20 в процессах горячей пластической деформации.

За последнее десятилетие в ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» активно развивается исследовательская материально-техническая база, активно работают общепризнанные и вновь созданные научные школы под руководством ведущих специалистов в области металлургии. Подтверждением значимости проводимых в университете работ является участие специалистов МГТУ в различных проектах при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации и сотрудничество с крупнейшими предприятиями металлургической отрасли [19–28].

Методика проведения эксперимента

Горячая деформация сжатием осуществлялась на комплексе физического моделирования GLEEBLE 3500. Использовались цилиндрические образцы диаметром 10 мм и длиной 80 мм из стали 20. Образцы были установлены в медные захваты. Нагрев реализовывался прямым пропусканием электрического тока, контроль температуры осуществлялся при помощи термопары, приваренной к поверхности образца. Процесс изотермической горячей деформации с одноосным сжатием осуществлялся при температурах 1200, 1100, 1000°C, с истинной логарифмической степенью деформации $\varepsilon=0,8$ и скоростях деформации 0,1, 0,5, 1 с⁻¹. Перед деформированием образец нагревался до температуры 1200°C со скоростью 5°C/с и выдерживался при ней в течение 5 мин для проведения полной аустенизации. Степень деформации опре-

делялась контактным способом при помощи датчика поперечной деформации CGuage [18].

Методика математического расчета значений сопротивления деформации

Построение экспериментальных кривых текучести

На рис. 2 представлены графики зависимости сопротивления деформации от степени деформации, полученные на основании экспериментов. Вид кривых текучести наглядно показывает эффект разупрочнения, выраженный в виде падения сопротивления деформации после достижения пикового значения. При этом разупрочнение является результатом протекания процессов динамического возврата и рекристаллизации.

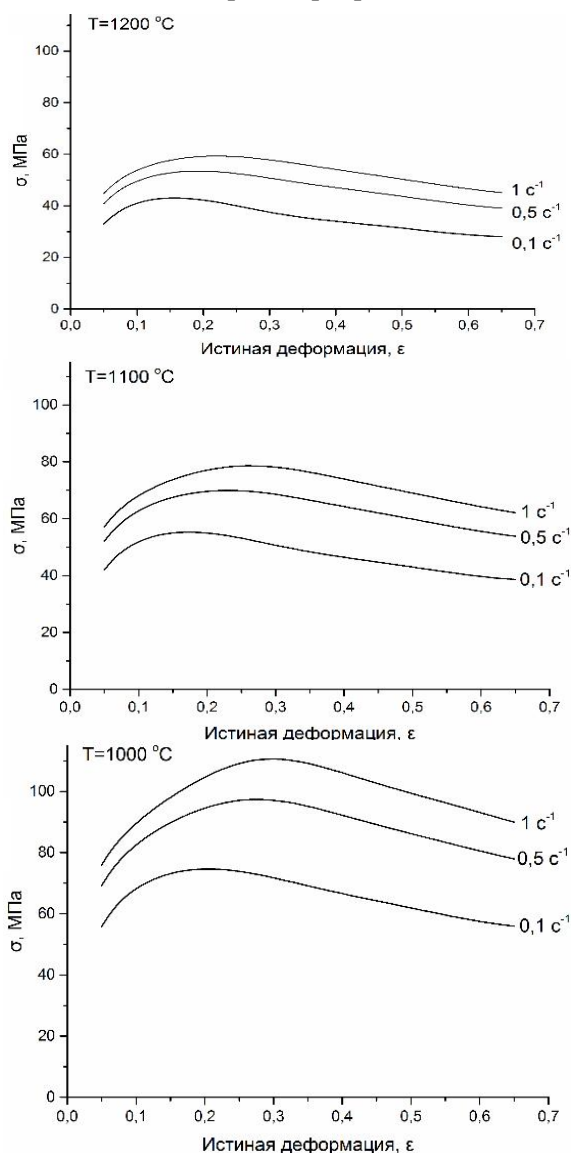


Рис. 2. Экспериментальная зависимость сопротивления деформации стали 20 при различных температурно-скоростных режимах одноосного сжатия

Нахождение параметров модели горячей деформации на основании экспериментальных данных

Реологические свойства металла могут быть описаны с использованием параметра Зинера-Холломоуна (Z). Он позволяет, на основании термо-кинетической теории, с использованием уравнения Аррениуса, численно установить взаимосвязь сопротивления деформации с температурой и скоростью деформации [1].

Параметр Z может иметь следующие математические выражения:

$$F(\sigma) = \sigma^{n'} \quad \text{для } \alpha\sigma < 0.8; \quad (1)$$

$$F(\sigma) = \exp(\beta\sigma) \quad \text{для } \alpha\sigma > 1.2; \quad (2)$$

$$F(\sigma) = [\sinh(\alpha\sigma)]^n \quad \text{для всех } \sigma; \quad (3)$$

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = AF(\sigma); \quad (4)$$

$$\dot{\epsilon} = AF(\sigma) \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), \quad (5)$$

где R – универсальная газовая константа (8,31 Дж/моль·К); T – абсолютная температура (К); Q – энергия активации (кДж/моль); $A, A', A'', \alpha, \beta, n, n'$ – коэффициенты материала; $\alpha = \beta / n'$.

Таким образом, функция изменения сопротивления деформации может быть записана в трех различных вариантах (1)–(3): 1 – степенная функция, 2 – экспоненциальная функция, 3 – функция гиперболического синуса.

Для определения коэффициентов материала запишем (5) с учетом (1)–(3) в следующем виде:

$$\dot{\epsilon} = B\sigma^{n'}; \quad (6)$$

$$\dot{\epsilon} = C \exp(\beta\sigma); \quad (7)$$

$$\dot{\epsilon} = D \sinh(\alpha\sigma)^n, \quad (8)$$

где B, C, D – коэффициенты материала, зависящие от температуры.

Используя экспериментальные кривые текучести (см. рис. 2), выбрав значение степени деформации, взяв натуральный логарифм обеих частей (6)–(8) и продифференцировав их, можно построить графики зависимости $\ln(\dot{\epsilon})$ от $\ln(\sigma)$, σ , $\ln(\sinh(\alpha\sigma))$ для разных температур (рис. 3). При построении данных графиков значения сопротивления деформации выбиралась для степени деформации $\epsilon = 0,1$. Коэффициенты материала n', β, n определяются как среднее значение углов наклона кривых соответственно (см. рис. 3):

$$n' = \left[\frac{d \ln \dot{\epsilon}}{d \ln \sigma} \right]_T; \quad (9)$$

$$\beta = \left[\frac{d \ln \dot{\epsilon}}{d \sigma} \right]_T; \quad (10)$$

$$n = \left[\frac{d \ln \dot{\epsilon}}{d \ln (\sinh (\alpha \sigma))} \right]_T. \quad (11)$$

Полученные линейной аппроксимацией значения коэффициентов η' , β , η составили 8,28, 0,14 и 6,19 МПа⁻¹ соответственно. Значение α определяется как $\alpha = \beta / n' = 0,01$.

Из анализа кривых на **рис. 3** можно установить, что точки, соответствующие различным скоростям деформации при одинаковой температуре, лежат на одной прямой, а прямые, соответствующие различным температурам, параллельны между собой. Таким образом, можно сделать вывод, что значения рассчитанных выше коэффициентов не зависят от температуры и скорости деформации.

Для определения значения энергии активации Q запишем (5) в следующем виде:

$$\dot{\epsilon} = A' \sigma^{n'} \exp \left(-\frac{Q}{RT} \right); \quad (12)$$

$$\dot{\epsilon} = A'' \exp(\beta \sigma) \exp \left(-\frac{Q}{RT} \right); \quad (13)$$

$$\dot{\epsilon} = A [\sinh (\alpha \sigma)]^n \exp \left(-\frac{Q}{RT} \right). \quad (14)$$

Взяв натуральный логарифм обеих частей (12)–(14) и продифференцировав их для $\dot{\epsilon} = const$, получим

$$Q = Rn' \left[\frac{d (\ln [\sigma])}{d (1/T)} \right]_{\dot{\epsilon}}; \quad (15)$$

$$Q = R\beta \left[\frac{d (\sigma)}{d (1/T)} \right]_{\dot{\epsilon}}; \quad (16)$$

$$Q = Rn \left[\frac{d \{ \ln [\sinh (\alpha \sigma)] \}}{d (1/T)} \right]_{\dot{\epsilon}}. \quad (17)$$

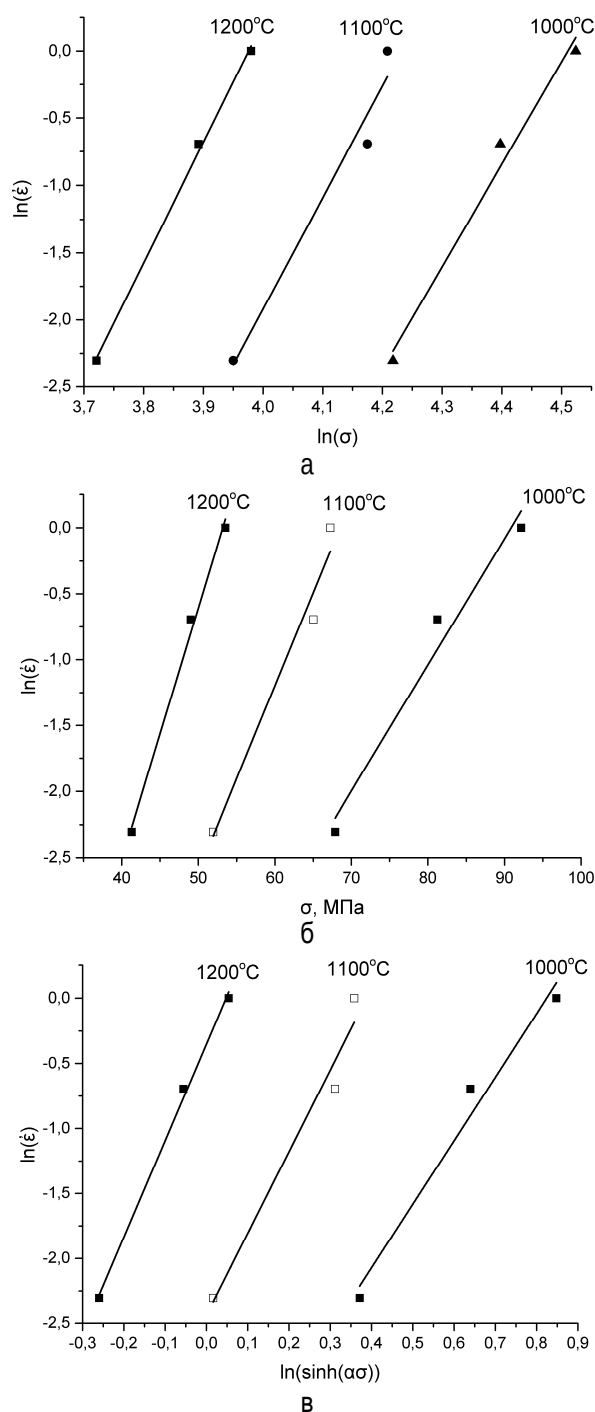


Рис. 3. Определение коэффициентов $\eta'(a)$, $\beta(b)$, $\eta(v)$

На **рис. 4** представлены группы кривых, отображающих зависимость $\ln(\sigma)$, σ , $\ln(\sinh(\alpha\sigma))$ от $1/T$ ($T=1000, 1100, 1200^\circ\text{C}$) при различных скоростях деформации. Значение Q может быть определено как среднее значение тангенсов углов наклона этих графиков. Численные значения энергии активации Q , рассчитанные по (15)–(17) составляют 332, 361, 341 кДж/моль соответственно.

Таблица 1

Значения параметра Зинера-Холломоуна (Z)
в соответствии с (4)

T, °C	$\dot{\varepsilon}$, с ⁻¹	Z		
		Степенная функция (1)	Экспоненциальная функция (2)	Функция гиперболического синуса (3)
1200	0.1	6,26E+10	6,68E+11	1,30E+11
	0.5	3,13E+11	3,34E+12	6,50E+11
	1	6,26E+11	6,68E+12	1,30E+12
1100	0.1	4,53E+11	5,74E+12	9,91E+11
	0.5	2,26E+12	2,87E+13	4,95E+12
	1	4,53E+12	5,74E+13	9,91E+12
1000	0.1	4,47E+12	6,91E+13	1,04E+13
	0.5	2,23E+13	3,46E+14	5,20E+13
	1	4,47E+13	6,91E+14	1,04E+14

Для определения численного значения параметра Зинера-Холломоуна при заданных скоростях и температурах деформирования, с учетом уравнений (1)–(5), запишем следующее:

$$Z = A'\sigma^{n'}; \quad (18)$$

$$Z = A'' \exp(\beta\sigma); \quad (19)$$

$$Z = A \sinh(\alpha\sigma)^n. \quad (20)$$

Численные значения параметра Z, рассчитанные в соответствии с (18)–(20), представлены в табл. 1.

Взяв натуральный логарифм обеих частей (18)–(20), получим

$$\ln(Z) = \ln(A') + n' \ln(\sigma); \quad (21)$$

$$\ln(Z) = \ln(A'') + \beta\sigma; \quad (22)$$

$$\ln(Z) = \ln(A) + n \ln(\sinh(\alpha\sigma)). \quad (23)$$

Используя данные табл. 1 и экспериментальных кривых текучести (см. рис. 2), можно построить зависимость $\ln(Z)$ от $\ln(\sigma)$, σ , $\ln(\sinh(\alpha\sigma))$ (рис. 5). Значения $\ln(A')$, $\ln(A'')$, $\ln(A)$ в (21)–(23) определяются на основании линейной аппроксимации графиков на рис. 5 и численно равны -5,82, 22,11, 27,48 соответственно.

После того как все константы материала определены, значение сопротивления деформации может быть рассчитано в соответствии с (4) как

$$\sigma = \left(\frac{Z}{A'} \right)^{1/n'} = \left(\frac{\dot{\varepsilon} \cdot \exp\left(\frac{332707,49}{RT}\right)}{e^{-5,82}} \right)^{1/8,28}; \quad (24)$$

$$\sigma = \frac{\ln(Z) - \ln(A)}{\beta} = \frac{\ln\left(\dot{\varepsilon} \cdot \exp\left(\frac{361704,13}{RT}\right)\right) - 22,11}{0,14}; \quad (25)$$

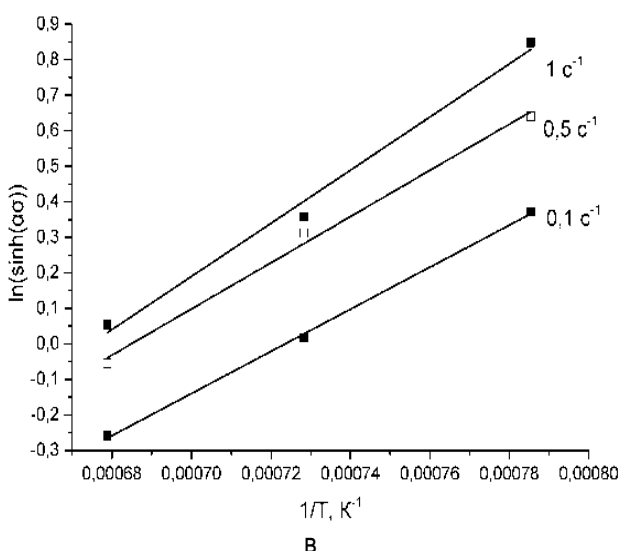
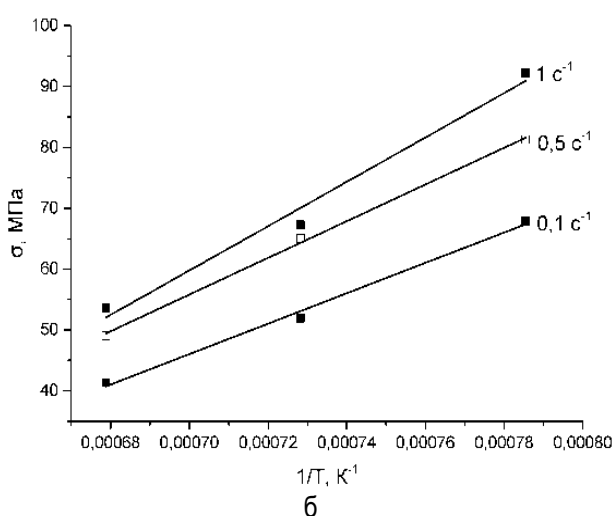
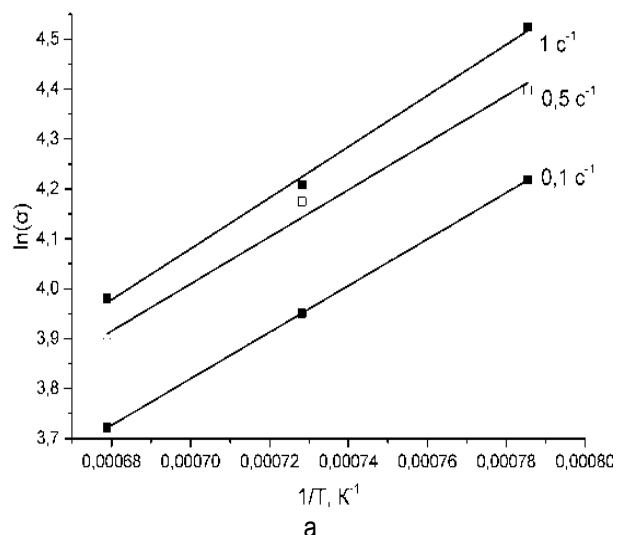


Рис. 4. Определение значения энергии активации Q:
а – степенная зависимость;
б – экспоненциальная зависимость;
в – функция гиперболического синуса

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \sinh^{-1} \left(\frac{Z}{A} \right)^{1/n} =$$

$$= \frac{1}{0,01} \sinh^{-1} \left(\frac{\dot{\varepsilon} \cdot \exp \left(\frac{341643,99}{RT} \right)}{e^{27,48}} \right)^{1/6,19} \quad (26)$$

Значения сопротивления деформации, полу–

ченные экспериментальным путем, по (24)–(26) и их сравнение представлены в табл. 2, а графическая интерпритация – на рис. 6.

Если точки на рис.6 лежат на одной прямой, то это свидетельствует о высокой сходимости экспериментальных и расчетных данных. Таким образом, можно сделать вывод, что использование степенной функции ((1), рис. 6, а) и функции гиперболического синуса ((3), рис. 6, в) позволяют получить наиболее достоверные результаты.

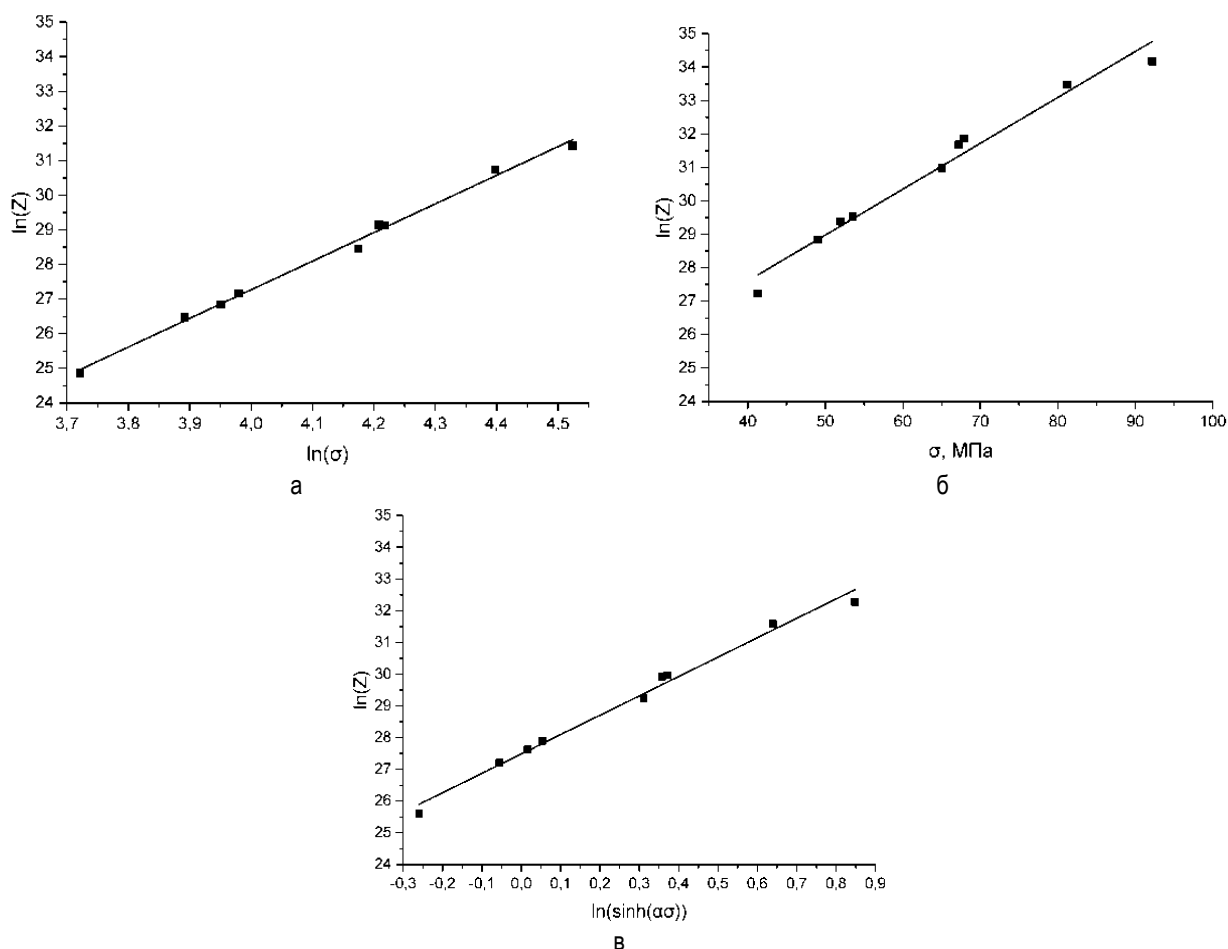


Рис. 5. Определение коэффициентов A'(а), A''(б), A(в)

Таблица 2

Рассчитанные значения сопротивления деформации

Экспериментальное значение сопротивления деформации σ_e	Степенная функция (1)	% ошибки	Экспоненциальная функция (2)	% ошибки	Функция гиперболического синуса (3)	% ошибки
41,31	40,48	2,01	35,88	13,14	42,83	3,69
49,01	49,15	0,29	47,18	3,74	54,87	11,96
53,52	53,44	0,14	52,04	2,76	59,91	11,94
51,95	51,39	1,07	50,98	1,87	58,02	11,69
65,03	62,40	4,04	62,27	4,24	67,23	3,39
67,24	67,85	0,90	67,14	0,16	69,98	4,06
67,88	67,73	0,21	68,44	0,83	70,15	3,34
81,23	82,25	1,26	79,74	1,84	74,93	7,75
92,18	89,42	2,99	84,60	8,22	76,59	16,91

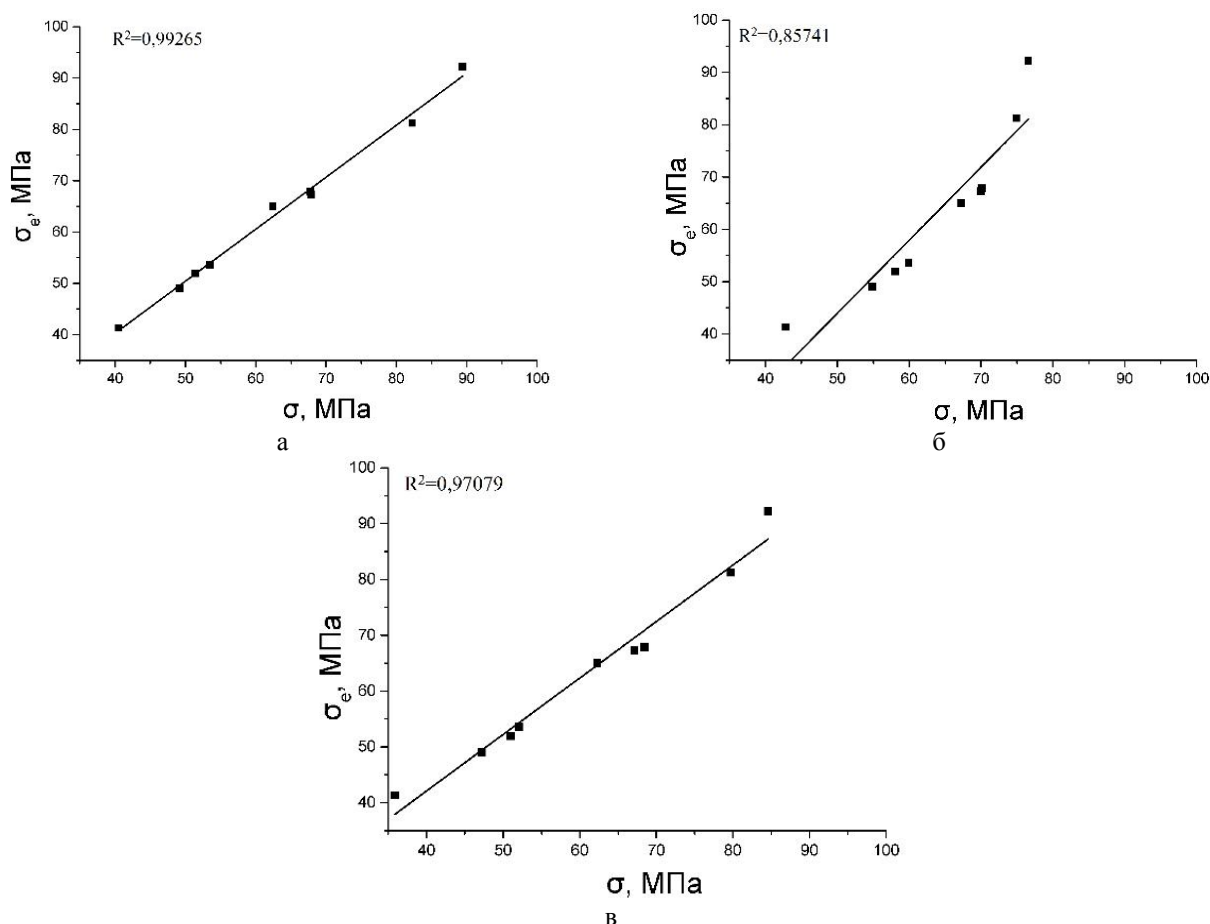


Рис. 6. Сравнение экспериментальных и рассчитанных значений сопротивления деформации в соответствии с уравнением (1): а – степенная зависимость; б – экспоненциальная зависимость; в – функция гиперболического синуса

Как было указано выше, при расчетах была выбрана степень деформации $\epsilon=0,1$. Данная степень деформации выбиралась произвольно, в качестве примера. Используя данную методику и выбирая последовательно другие степени деформации, во всем диапазоне, для которого построены кривые текучести, можно построить полную модель реологических свойств стали 20.

Закключение и выводы

Исследован характер деформационного течения стали 20 при одноосном сжатии на комплексе физического моделирования Gleeble 3500 и диапазоне температур 1000–1200°C, скоростей деформации 0,1–1 с⁻¹. Сделаны следующие выводы:

1. Получены экспериментальные кривые текучести стали 20 при различных условиях деформирования. На кривых текучести можно отметить критические точки и участки, соответствующие основным этапам процесса горячей деформации: динамическое упрочнение, динамический возврат, динамическая рекристаллизация.

2. Получены численные значения коэффициентов для расчета параметра Зинера-Холломона (Z). Установлено, что коэффициенты уравнений состояния не зависят от условий деформирования. С использованием Z формализованы уравнения состояния для стали 20, устанавливающие связь сопротивления деформации с температурой, скоростью, степенью деформации.

3. На основании сравнения численных значений сопротивления деформации, рассчитанных по полученным уравнениям состояния, с экспериментальными значениями установлено, что наиболее адекватным является использование в уравнениях состояния степенной функции и функции гиперболического синуса.

Представленная методика позволяет на основании небольшого количества экспериментальных исследований получить уравнения состояния материалов при деформировании в заданном температурно-скоростном диапазоне, что позволяет значительно сократить количество экспериментов, проводимых, в том числе, и на промышленном

оборудовании. Полученные уравнения состояния могут быть использованы для расчета напряженно-деформированного состояния, энергосиловых параметров, технологических режимов обработки не только в прикладных программных комплексах, но и в промышленных системах автоматизации.

Список литературы

1. Flow curve analysis of 17-4PH stainless steel under hot compression test / Hamed Mirzadeh, Abbas Najafizadeh, Mohammad Moazeny // The minerals, metals & materials society and ASM international. 2009. Vol. 40A. P. 2950–2985.
2. Dynamic recrystallization behavior and hot deformation characteristics in 4340 steel / S. V. Sajadifar, M. Ketabchi, B. Bemanizadeh // Metallurgist. 2012. Vol. 56. P. 310–320.
3. Hot deformation behavior and flow stress model of F40MNV steel / Wang Jin, Chen Jun, Zhao Zhen, Ruan Xue-Yu. // J. Cent. South Univ. Technol. 2007. P. 19–23.
4. Prediction of dynamic recrystallization kinetics and grain size for 410 martensitic stainless steel during hot deformation / A. Momeni And K. Dehghani // Met. Mater. Int. 2010. Vol. 16. No. 5. P. 843–849.
5. Investigation of dynamic and static recrystallization behavior during thermomechanical processing in a API-X70 micro alloyed steel / Bahmanmir Zakhani, Mohammad Taghisalehi, Shahink Hoddam, Seyedhosein Seyedein, Mohammad Reza Aboutalebi // Journal Of Materials Engineering And Performance. 2009. Vol. 18(8). P. 1029–1034.
6. Hot deformation behaviors and flow stress model OFGCr15 bearing steel / Liao Shu-Lun, Zhang Li-Wen, Yue Chong-Xiang, Pei Ji-Bin, Gao Hui-Ju. // J. Cent. South Univ. Technol. 2008. No. 15. P. 575–580.
7. Dynamic recrystallization during hot deformation of 304 austenitic stainless steel / A. Marchattiwar, A. Sarkar, J.K. Chakravarty, and B.P. Kashyap // Journal Of Materials Engineering And Performance. 2013. Vol. 22(8). P. 2168–2175.
8. Modeling flow stress of 70Cr3MO steel used for back-up roll during hot deformation considering strain compensation / Renfa-Cai, Chenjun // Journal Of Iron and Steel Research. 2013. No. 20 (11). P. 118–124.
9. Deformation characteristic and prediction of flow stress for as-cast 21Cr economical duplex stainless steel under hot compression / De-Ningzou, Kun Wu, Ying Han, Wei Zhang, Bao Cheng, Guan-Jun Qiao // Materials and design. 2013. Vol. 51. P. 975–982.
10. Constitutive modeling for flow behavior of GCr15 steel under hot compression experiments / Fei Yin, Lin Hua, Huajie Mao, Xinghui Han // Materials And Design. 2013. Vol. 43. P. 393–401.
11. The flow behavior and constitutive equation in isothermal compression of FGh4096-Gh4133B dual alloy / Yanhui Liu, Zekun Yao, Yongquanning, Yang Nan, Hongzhenguo, Chun Qin, Zhifeng Shi. // Materials And Design. 2014. Vol. 63. P. 829–837.
12. Hot deformation behavior and flow stress modeling of annealed AZ61 Mg alloys/ Chinghao Liao, Hongyu Wu, Chengtao Wu, Fengjun Zhu, Shyong Lee. // Progress In Natural Science: Materials International. 2014. Vol. 24. P. 253–265.
13. Modeling and prediction of hot deformation flow curves / Hamed Mirzadeh, Jose Maria Cabrera, And Abbas Najafizadeh // The Minerals, Metals & Materials Society And ASM International. 2012. Vol. 43a. P. 108–122.
14. Modeling the flow curve of AISI 410martensitic stainless steel / A. Momeni, K. Dehghani, M. Heidari, And M. Vaseghi // Journal Of Materials Engineering And Performance. 2012. Vol. 21(11). P. 2238–2242.
15. Constitutive description for the design of hot-working operations of a 20MnCr5 steel grade / Eli Salpuchi-Cabrera, Jean-Dominique Guerin, Mirentxudu- bar, Mariana H. Staia,Jacky Lesage, Didier Chicot // Materials and design. 2014. Vol. 62. P. 255–264.
16. Constitutive modeling for flow stress of 55SiMnMo bainite steel at hot- working conditions / Tao Yan, Enlin Yu, Yuqian Zhao. // Materials and design. 2013. Vol. 50. P. 574–580.
17. Физическое и математическое моделирование горячей деформации стали 20Х13/ А.М. Ахмедьянов, С.В. Рушниц, М.А. Смирнов // Вест. Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер. «Металлургия». 2013. Вып. 13. № 2. С. 116–124.
18. Ишимов А.С., Жеребцов М.С., Чукин Д.М. Моделирование процессов с большими степенями накопленной деформации на исследовательском комплексе Gleeble3500 // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: материалы 71-й межрегиональной научно-технической конференции / под ред. В.М. Колокольцева. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. Т.1. С. 251–254.
19. Барышников М.П., Чукин М.В., Бойко А.Б. Анализ программных комплексов для расчета напряженно-деформированного состояния композиционных материалов в процессах обработки давлением // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. №4. С. 72–74.
20. Производство высокопрочной стальной арматуры для железобетонных шпал нового поколения / под общ. ред. М.В. Чукина. М.: Metallurgizdat, 2014. 276 с.
21. Колокольцев В.М. Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. История. Развитие // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. №1. С. 5–6.
22. Научная деятельность ГОУ ВПО «МГТУ» в условиях развития нанотехнологий / Чукин М.В., Колокольцев В.М., Гун Г.С., Салганик В.М., Платов С.И. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2009. №2. С. 55–59.
23. Колокольцев В.М. Пять лет от аттестации до аттестации // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2008. №1. С. 5–11.
24. Гун Г.С. Инновационные методы и решения в процессах обработки материалов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. №4. С. 99–113.
25. Nanodimensional structural part formation in high carbon steel by thermal and deformation processing / Chukin M.V., Korchunov A.G., Gun G.S., Polyakova M.A., Koptseva N.V. // Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University. 2013. №5. С. 33–35.
26. 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.
27. Особенности реологических свойств конструкционных наносталей / Чукин М.В., Гун Г.С., Барышников М.П., Валиев Р.З., Рааб Г.И. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2008. №1. С. 24–27.
28. Исследование формирования субмикроструктурной структуры поверхностного слоя стальной проволоки с целью повышения уровня ее механических свойств / Гун Г.С., Чукин М.В., Емалеева Д.Г., Колцева Н.В., Ефимова Ю.Ю., Барышников М.П. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2007. №4. С. 89–93.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

ON THE SELECTION OF A MATHEMATICAL FUNCTION OF THE EQUATION OF STATE FOR A DESCRIPTION OF RHEOLOGICAL PROPERTIES OF STEEL 20 DURING HOT PLASTIC DEFORMATION

Ishimov Alexey Sergeevich – Postgraduate Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. E-mail: TTSoprano.A@gmail.com.

Baryshnikov Mikhail Pavlovich – Ph.D. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. E-mail: arcosmag@mail.ru.

Chukin Mikhail Vitalievich – D.Sc. (Eng.), Professor, First Vice-Rector – Vice-Rector for Science and Innovation, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. E-mail: chukin@magtu.ru.

Abstract. The hot deformation behavior of steel 20 was investigated by conducting the isothermal uniaxial compression test using physical modeling complex Gleeble 3500 within a temperature range of 1000–1200°C and a strain rate range of 0.1–1 s⁻¹. The experimental yield curves shows critical points and sections, corresponding to main stages of a hot deformation process such as dynamic hardening, dynamic recovery, and dynamic recrystallization. A comparative analysis of mathematical functions allowing us to describe rheological properties of steel 20 was conducted. The activation energy (Q) and the Zener-Hollomon parameter (Z) values were determined. The state equations of steel 20 were defined.

Keywords: dynamic recrystallization, Gleeble 3500, hot deformation, rheological properties, Zener-Hollomon parameter, deformation stress.

References

1. Mirzadeh Hamed, Najafizadeh Abbas, Moazeny Mohammad. Flow curve analysis of 17-4PH stainless steel under hot compression test. The minerals, metals & materials society and ASM international. 2009, vol. 40A, pp. 2950-2985.
2. Sajadifar S.V., Ketabchi M., Bemanizadeh B. Dynamic recrystallization behavior and hot deformation characteristics in 4340 steel. Metallurgist. 2012, vol. 56, pp. 310-320.
3. Wang Jin, Chen Jun, Zhao Zhen, Ruan Xue-Yu. Hot deformation behavior and flow stress model of F40MNV steel. J. Cent. South Univ. Technol. 2007, pp. 19-23.
4. Momeni A. and Dehghani K. Prediction of dynamic recrystallization kinetics and grain size for 410 martensitic stainless steel during hot deformation. Met. Mater. Int. 2010, vol. 16, no. 5, pp. 843-849.
5. Zakhani Bahmanmir, Taghisalehi Mohammad, Hoddam Shahink, Seyedein Seyedhosein, Reza Aboutalebi Mohammad. Investigation of dynamic and static recrystallization behavior during thermomechanical processing in an API-X70 micro alloyed steel. Journal of Materials Engineering and Performance. 2009, vol. 18(8), pp. 1029-1034.
6. Liao Shu-Lun, Zhang Li-Wen, Yue Chong-Xiang, Pei Ji-Bin, Gao Hui-Ju. Hot deformation behaviors and flow stress model OFGCr15 bearing steel. J. Cent. South Univ. Technol. 2008, no. 15, pp. 575-580.
7. Marchattiwar A., Sarkar A., Chakravarty J.K., and Kashyap B.P. Dynamic recrystallization during hot deformation of 304 austenitic stainless steel. Journal of Materials Engineering and Performance. 2013, vol. 22(8), pp. 2168-2175.
8. Chen Jun, Ren Fa-Cai. Modeling flow stress of 70Cr3MO steel used for back-up roll during hot deformation considering strain compensation. Journal of Iron and Steel Research. 2013, no. 20 (11), pp. 118-124.
9. De-Ningzou, Kun Wu, Ying Han, Wei Zhang, Bao Cheng, Guan-Jun Qiao. Deformation characteristic and prediction of flow stress for as-cast 21Cr economical duplex stainless steel under hot compression. Materials and design. 2013, vol. 51, pp. 975-982.
10. Fei Yin, Lin Hua, Huajie Mao, Xinghui Han. Constitutive modeling for flow behavior of GCr15 steel under hot compression experiments. Materials and Design. 2013, vol. 43, pp. 393-101.
11. Yanhui Liu, Zekun Yao, Yongquanning, Yang Nan, Hongzhenguo, Chun Qin, Zhifeng Shi. The flow behavior and constitutive equation in isothermal compression of FGh4096-Gh4133B dual alloy. Materials and Design. 2014, vol. 63, pp. 829-837.
12. Chinghao Liao, Hongyu Wu, Chengtao Wu, Fengjun Zhu, Shiyong Lee. Hot deformation behavior and flow stress modeling of annealed AZ61 Mg alloys. Progress in Natural Science: Materials International. 2014, vol. 24, pp. 253-265.
13. Hamed Mirzadeh, Jose Maria Cabrera, and Abbas Najafizadeh. Modeling and prediction of hot deformation flow curves. The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International. 2012, vol. 43a, pp. 108-122.
14. A. Momeni, K. Dehghani, M. Heidari, and M. Vaseghi. Modeling the flow curve of AISI 410 martensitic stainless steel. Journal of Materials Engineering and Performance. 2012, vol. 21(11), pp. 2238-2242.
15. Eli Salpuchi-Cabrera, Jean-Dominique Guerin, Mirentxudu-bar, Mariana H. Staia, Jacky Lesage, Didier Chicot. Constitutive description for the design of hot-working operations of a 20MnCr5 steel grade. Materials and design. 2014, vol. 62, pp. 255-264.
16. Tao Yan, Enlin Yu, Yuqian Zhao. Constitutive modeling for flow stress of 55SiMnMo bainite steel at hot-working conditions. Materials and design. 2013, vol. 50, pp. 574-580.
17. Akhmedyanov A.M., Rushchits S.V., Smirnov M.A. Physical and numerical modeling of hot deformation behavior of 20Kh13 steel. Vestnik Yuzhno-Uralskogo Gosudarstvennogo Universiteta, seriya "Metallurgiya" [Bulletin of the Ural State University. Series "Metallurgy"], 2013, issue 13, no.2, pp. 116-124.
18. Ishimov A.S., Zherebtsov M.S., Chukin D.M. Modelirovanie protsessov s bolshimi stepenyami nakoplennoy deformatsii na isledovatel'skom komplekse Gleeble 3500 [Modelling of high strain processes using Gleeble 3500 system]. Aktualnie problemi sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya: materialy 71 mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii [Current problems of modern science, machines and education: proceedings of the 71st scientific and technical conference, edited by V.M. Kolokoltsev], Magnitogorsk, 2013, vol. 1, pp. 251-254.
19. Baryshnikov M.P., Chukin M.V., Boiko A.B. Analiz programnykh kompleksov dlya rascheta napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya kompozitsionnykh materialov v protsessakh obrabotki davleniem [Analysis of software complexes for calculation of a stress-strain state of composite materials during deformation processes]. Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2012, no. 4, pp. 72-74.
20. Chukin M.V. Proizvodstvo vysokoprochnoy stalnoy armatury dlya zhelezobetonnnykh shpal novogo pokoleniya [Production of high-strength steel reinforcement for a new generation of concrete

- sleepers]. Moscow: Metallurgizdat, 2014, 276 p.
21. Kolokoltsev V.M. Magnitogorskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet im. G.I. Nosova. Istoriya. Razvitiye. [Nosov Magnitogorsk State Technical University. History. Development]. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2014, no.1. pp. 5-6.
 22. Chukin M.V., Kolokoltsev V.M., Gun G.S., Salganik V.M., Platov S.I. Nauchnaya deyatel'nost' GOU VPO «MGU» v usloviyakh razvitiya nanotekhnologii [Scientific activity of NMSTU in terms of nanotechnology development]. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2009, no.2, pp. 55-59.
 23. Kolokoltsev V.M. Pyat let ot attestatsii do attestatsii [Five years from a certification to a certification]. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2008, no.1, pp. 5-11.
 24. Gun G.S. Innovatsionnye metody i resheniya v protsessakh obrabotki materialov [Innovative methods and solutions in materials processing]. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2014, no.4, pp. 99-113.
 25. Chukin M.V., Korchunov A.G., Gun G.S., Polyakova M.A., Koptseva N.V. Nanodimensional structural part formation in high carbon steel by thermal and deformation processing. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2013, no.5, pp. 33-35.
 26. Gun G.S., Mezin I.Yu., Korchunov A.G., Chukin M.V., Gun I.G., Rubin G.Sh. Nauchno-pedagogicheskaya shkola magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta po upravleniyu kachestvom produktsii i proizvodstvennykh protsessov [Scientific and pedagogical school of NMSTU on quality management of products and processes]. *Kachestvo v obrabotke materialov* [Quality in metal treatment], 2014, no.1, pp. 5-9.
 27. Chukin M.V., Gun G.S., Baryshnikov M.P., Valiev R.Z., Raab G.I. Osobennosti reologicheskikh svoystv konstruktivnykh nanostaley [Features of rheological properties of structural nanosteels]. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2008, no.1, pp. 24-27.
 28. Gun G.S., Chukin M.V., Emaleeva D.G., Koptseva N.V., Efimova Yu.Yu., Baryshnikov M.P. Issledovanie formirovaniya submikrokristallicheskoy struktury poverkhnostnogo sloya stal'noy provoloki s tselyu povysheniya urovnya ee mekhanicheskikh svoystv [Study of the formation of a submicrocrystalline structure of a steel wire surface layer in order to improve its mechanical properties]. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2007, no.4. pp. 89-93.

УДК 621.744

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРЕЖЕНИЯ И ОТСТАВАНИЯ ПРИ ПРОКАТКЕ

Некит В.А., Платов С.И., Курбаков И.А., Голев А.Д.

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

Аннотация. Представлен новый метод исследования кинематических параметров прокатки полос. Новизна метода состоит в одновременном измерении опережения и отставания, что позволяет фиксировать наличие скольжения (пробуксовывания) полосы относительно валков. Для характеристики опережения и отставания использовались относительные величины - коэффициенты опережения и отставания. Представлены результаты экспериментального определения опережения и отставания при прокатке свинцовых полос на лабораторном прокатном стане. Определены значения величин пробуксовки полосы относительно валков при использованных режимах прокатки.

Ключевые слова: прокатка, опережение, отставание, скольжение.

Введение

Исследование опережения применяется для определения коэффициента трения при прокатке и является одним из наиболее точных методов исследования трения [1,2]. Известен экспериментальный метод определения опережения, получивший название «кernовый метод». Недостаток метода заключается в том, что относительная величина опережения невелика, составляет несколько процентов, это снижает точность получаемых результатов. Кроме того, для исследования используют отрезки полосы, а при переходных режимах ускорения или торможения возможно скольжение полосы относительно валков [3–5].

Теория и методы исследования

В настоящей работе представлен усовершенствованный метод исследования, который позволяет частично устранить вышеупомянутые недостатки. Суть его состоит в том, что одновременно с опережением измеряется отставание. Совокупность этих методов с учетом кинематики процесса прокатки позволяет определить расчетным путем величину скольжения. По аналогии с методом экспериментального определения опережения, отставание можно определить путем отслеживания меток на полосе перед прокаткой и их следа на валках после прокатки. Метки в этом случае могут быть нанесены путем окрашивания

на полосе. На **рисунке** представлена схема нанесения и измерения контрольных отрезков для определения отставания в процессе прокатки полос. Метки на полосе 1 дают отпечатки на валке после прокатки 2, расстояние между метками принимается за контрольный отрезок.

Теоретические формулы значительно упрощаются, если для характеристики опережения и отставания применять относительные величины – коэффициенты опережения и отставания.

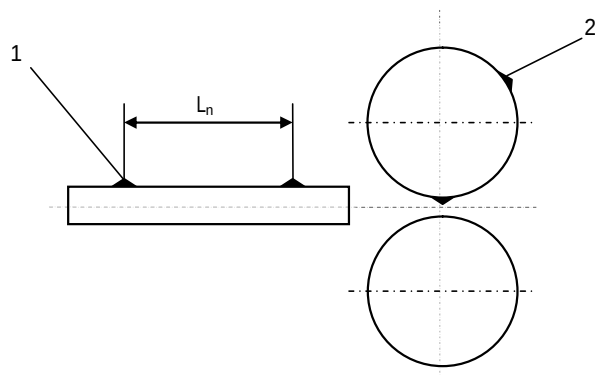


Схема нанесения меток при измерении отставания полосы при прокатке: 1 – метка на полосе; 2 – отпечаток на валке

Из условия постоянства секундного объема с использованием гипотезы плоских сечений при прокатке коэффициенты опережения и отставания можно определить по формулам:

– коэффициент отставания

$$W_{ot} = \frac{v_{no}}{v_b}, \quad (1)$$

где v_{no} – скорость полосы перед входом в валки;
 v_b – линейная скорость валков;
 – коэффициент опережения

$$\omega_{on} = \frac{v_n}{v_b}, \quad (2)$$

где v_n – скорость полосы после выхода из валков.

Согласно принятым обозначениям коэффициент вытяжки определится

$$\lambda = \frac{v_n}{v_{no}}. \quad (3)$$

Таким образом, уравнение связи между коэффициентами опережения и отставания будет

$$W_{ot} \cdot W_{on} = \lambda. \quad (4)$$

Заменив отношение скоростей отношением отрезков на полосе и валках, получим основное кинематическое уравнение с учетом скольжения полосы относительно валков

$$\frac{L_b}{L_n - s} \cdot \frac{L_{1n} + s}{L_{1b}} = \lambda, \quad (5)$$

где s – путь скольжения; L_n – длина отрезка на полосе; L_b – длина отрезка на валке; L_{1n} – длина отпечатка на полосе; L_{1b} – длина отпечатка на валке.

С учетом скольжения величины коэффициентов опережения и отставания определяются по формулам:

$$\omega_{om} = \frac{L_b - s}{L_n}; \quad (6)$$

$$\omega_{on} = \frac{L_{1n} + s}{L_{1b}}. \quad (7)$$

Исследование опережения и отставания при прокатке свинцовых полос проводили на лабораторном стане в валках диаметром 150 мм, контрольные отрезки наносились: на валках – с помощью кернов, на полосе – красителем. Обе метки размещались с одной стороны полосы с условием совпадения по месту прокатки. Параметры контрольных отрезков до и после прокатки и результаты расчета представлены в таблице. Результаты решения основного кинематического уравнения (5) получены численным методом и представлены в **таблице**.

Результаты измерения и расчета геометрических и кинематических параметров прокатки

Исходная толщина полосы Н	Конечная толщина полосы h	Степень деформации %	Угол захвата α	Ширина полосы В	Диаметр валков D	Коэффициент вытяжки λ	Длина отрезка на полосе L _n	Длина отрезка на валке L _b	Длина отпечатка на полосе L _{1n}	Длина отпечатка на валке L _{1b}	Путь скольжения s	Коэффициент опережения ω _{on}	Коэффициент отставания ω _{ot}
5,75	3,8	33,9	0,161	21,25	150	1,51	44,25	59,5	41,75	42	1,16	1,68	1,416
5,0	3,25	35	0,153	21,5	150	1,54	47,55	55,25	40,75	42	–0,64	1,12	1,384

Результаты исследования и их обсуждение

Скольжение полосы относительно валков при использованных режимах прокатки выражается как путь скольжения и может иметь положительное и отрицательное значение.

Выводы

Разработан и применен для исследования усовершенствованный метод определения кинематических параметров процесса прокатки. Согласно этому методу в процессе деформации полосы одновременно определяются параметры и опережения, и отставания. Новая методика изучения процесса прокатки апробирована на лабораторном стане. Полученные результаты экспериментального исследования показывают существование пробуксовки полосы относительно валков и необходимость коррекции величины опережения и отставания. Экспериментальные результаты не выявляют причину пробуксовки полосы в валках: пере-

менный режим, несимметричные условия, уширение полосы в процессе прокатки и др.

Список литературы

1. Теория прокатки: справочник / Целиков А.И., Томленов А.Д., Зюзин В.И. и др. М.: Металлургия, 1982. 335 с.
2. Грудев А.П. Теория прокатки. М.: Металлургия, 1988. 240 с.
3. Некит В.А. Условия трения и упругого сжатия валков при холодной прокатке листов и полос // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: сб. науч. тр. / под ред. В.М. Салганика. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2009. С. 101–104.
4. Некит В.А., Некит А.В. Моделирование процесса холодной прокатки тонких листов с учетом упрочнения металла в очаге пластической деформации // Процессы и оборудование металлургического производства: сб. науч. трудов / под ред. Платова С.И. Магнитогорск, 2009. С. 55–58.
5. Некит В.А. О положении нейтрального сечения в очаге пластической деформации при прокатке полос // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением. сб. науч. тр. / под ред. В.М. Салганика Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. С. 137–138.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

EXPERIMENTAL STUDY OF FORWARD AND BACKWARD SLIP DURING SHEET ROLLING

Nekit Vladimir Afanasievich – Ph.D (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. Phone: +7 (3519) 29 84 36. E-mail: Vladbmir@Nekit.info

Platov Sergey Iosifovich – D.Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department Machines and Metal Forming Technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. Phone: +7 (3519) 29 84 92. E-mail: psipsi@mail.ru

Kurbakov Ivan Andreevich – Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia.

Golev Aleksey Dmitrievich – Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia.

Abstract. This article presents a new method of study of sheet rolling kinematic parameters. The novelty of the method is simultaneous measurement of forward and backward slip, which allows us to determine slipping of sheets against rolls. To characterize forward and backward slip, relative values, forward and backward slip rates, were used. The paper gives results of experimental determination of forward and backward slip, when rolling lead sheets at a laboratory rolling mill. Values of sheet slipping against rolls at applied rolling modes are determined.

Keywords: rolling, forward slip, backward slip, slipping.

References

1. Tselikov A.I., Tomlenov A.D., Zyuzin V.I. et al. *Teoriya prokatki: Spravochnik* [Theory of rolling: Reference book]. Moscow: Metallurgiya, 1982, 335 p.
2. Grudev A.P. *Teoriya prokatki* [Theory of rolling]. Moscow: Metallurgiya, 1988, 240 p.
3. Nekit V.A. *Usloviya treniya i uprugogo szhatiya valkov pri kholodnoy prokatke listov i polos.* [Conditions of friction and elastic compression of rolls during sheet and strip cold rolling]. *Modelirovanie*

i razvitie protsessov obrabotki metallov davleniem. Sb. nauchn. trudov pod redaktsiei Salganika V.M. [Simulation and development of metal forming processes: collection of research papers edited by Salganik V.M.]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2009, pp. 101-104.

4. Nekit V.A. Nekit A.V. *Modelirovanie protsesssa kholodnoy prokatki tonkikh listov s uchetom uprochneniya metalla v ochage plasticheskoy deformatsii.* [Simulation of sheet cold rolling processes taking into account metal hardening in a zone of plastic deformation]. *Protsessy i oborudovanie metallurgicheskogo proizvodstva. Sb. nauchn. trudov pod redaktsiei Platova S.I.* [Metallurgical processes and equipment: collection of research papers edited by Platov S.I.]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2009, pp. 55-58.
5. Nekit V.A. *O polozhenii neitralnogo secheniya v ochage plasticheskoy deformatsii pri prokatke polos.* [On a position of a neutral plane in a zone of plastic deformation]. *Modelirovanie i razvitie protsessov obrabotki metallov davleniem. Sb. nauchn. trudov pod redaktsiei Salganika V.M.* [Simulation and development of metal forming processes: collection of research papers edited by Salganik V.M.]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2012, pp. 137-138.

УДК 620.17: 620.19

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА XSTRESS ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Карманов В.В.¹, Трофимов В.Н.¹, Нуртдинов А.С.¹, Звонов С.Н.²¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия² ООО «КСЕНА», г. Пермь, Россия

Аннотация. В статье рассмотрен опыт применения роботизированного комплекса для измерения технологических остаточных напряжений. Приведены обоснование выбора метода рентгеновской дифрактометрии для измерения напряжений. Дано описание роботизированного комплекса. Приведены описание и результаты измерений на плоских и круглых образцах, на детали сложной формы. Сделаны выводы о преимуществе применения роботизированного комплекса для контроля остаточных напряжений.

Ключевые слова: остаточные напряжения, роботизированный комплекс, измерение, рентгеновская дифрактометрия.

Введение

Одним из основных направлений повышения эксплуатационных характеристик изделий транспортного, энергетического и химического машиностроения является совершенствование технологических процессов их изготовления с целью повышения ресурса и исключения преждевременного разрушения.

Опыт эксплуатации различных конструкций показывает, что разрушение чаще всего связано с появлением поверхностных трещин. Одним из факторов, стимулирующих их появление и развитие, являются остаточные напряжения.

Остаточные макронапряжения или, по классификации Давиденкова Н.Н., остаточные напряжения 1 рода (далее RS_1 – residual stresses) возникают в изделиях, подвергаемых термообработке, обработке резанием, давлением, сваркой. В зависимости от знака и величины RS_1 оказывают как положительное, так и отрицательное влияние на статическую и циклическую прочность, ползучесть, коррозионную стойкость, коррозионное растрескивание нагруженных конструкций и деталей [1].

В связи с этим при производстве ответственных изделий машиностроения, наряду с традиционными геометрическими и механическими параметрами (шероховатость, модуль Юнга, предел прочности и др.), начинают использовать параметры, позволяющие контролировать процессы, связанные с изменением структуры материала изделия в процессе его производства, в частности уровень остаточных напряжений. На основе результатов контроля возможно проведение корректировки на этапе проектирования и освоения технологии изготовления изделия и отбраковки при его серийном производстве. Результаты контроля также могут быть использованы при создании баз данных и построении ма-

тематических моделей различных технологических процессов, что позволит прогнозировать уровень остаточных напряжений на конечной стадии производства изделий.

Метод исследования

Для ответственных деталей, характеризующихся высокой стоимостью материала и сложностью изготовления, актуальной задачей является контроль RS_1 на поверхности элементов конструкций на всех этапах технологического процесса их производства.

В связи с вышесказанным, можно сформулировать требования, предъявляемые к методу и оборудованию для контроля RS_1 в лабораторных условиях и условиях производства:

- метод должен быть неразрушающим;
- метод должен быть применим для широкого круга конструкционных металлов и сплавов, имеющих различные свойства и структуру (черных и цветных, магнитных и парамагнитных и др.);
- метод должен иметь отработанную научно-методическую базу для достоверной идентификации результатов измерений;
- результаты измерений должны быть применимы для калибровки других методов измерений RS_1 ;
- оборудование должно позволять измерять RS_1 на поверхности изделий сложной геометрии.

В настоящее время существует достаточно большое количество неразрушающих методов контроля остаточных напряжений: акустические методы (например, метод поверхностных волн Рэлея); рентгеновский метод; метод дифракции нейтронов; магнитострикционный метод; токовых метод; метод, основанный на эффекте Баркгаузена [3,4].

Одним из наиболее эффективных неразрушающих методов контроля RS_1 является метод рентгеновской дифрактометрии.

Метод рентгеновской дифрактометрии основан на измерении относительной деформации кристаллической решетки металла при температурном воздействии, при приложении внешних нагрузок, а также при действии остаточных напряжений [5, 6]. Расчёт остаточных напряжений производится по результатам измерений с использованием соотношений теории упругости. При отсутствии внешних нагрузок результаты расчёта определяют величину остаточных напряжений.

Отметим основные достоинства и недостатки метода по сравнению с известными методами:

- в процессе измерений не повреждается поверхность изделия, так как отсутствует контакт с элементами измерительного оборудования;
- метод не привязан к ненапряженному состоянию поликристаллического материала, так как в расчёте RS_1 используются параметры идеальной ненапряженной кристаллической решетки;
- метод позволяет определять RS_1 в заданных точках поверхностей, имеющих сложную геометрию;
- метод может быть использован в лабораторной практике для определения поверхностных RS_1 , обусловленных технологическими процессами термообработки, науглероживания, дробеструйной обработки, механической обработки резанием и условиями эксплуатации (например, усталостью) [7];
- высокая стоимость оборудования и его эксплуатации;
- повышенные требования к безопасности персонала.

Несмотря на указанные недостатки, метод рентгеновской дифрактометрии может быть признан наиболее эффективным для организации контроля технологических RS_1 .

Измерительный комплекс

Учитывая широкую номенклатуру изделий машиностроения и большое разнообразие технологических процессов их изготовления, для реализации метода рентгеновской дифрактометрии на базе кафедры «Инновационные технологии материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета была создана лаборатория, основой которой является измерительный комплекс компании XSTRESS на базе робота-манипулятора «KUKA».

Измерительный комплекс (рис. 1) включает следующие компоненты:

- камера 1 для защиты робота от механических повреждений и персонала от воздействия рентгеновского излучения;
- 6-ти осевой робот-манипулятор 2 с возможностью перемещения вдоль оси камеры при измерениях крупногабаритных деталей;

– патрон 3 (рис. 2) и вращающийся центр 4 для проведения измерений на поверхности крупногабаритных валов и осей, а также тел вращения, имеющих осевую симметрию (зубчатые колёса, диски и др.);

- система управления роботом-манипулятором на базе программируемой консоли, оснащенной промышленным дисплеем;
- гониометр 5 с источником и датчиками регистрации рентгеновского излучения;
- система обработки результатов измерения с использованием ПК и специализированного программного обеспечения;
- комплект для определения модуля Юнга материала исследуемых деталей с использованием плоских образцов.

Использование роботизированного измерительного комплекса позволяет решить ряд важных задач при проведении измерений и контроля RS_1 :

- практически полностью исключить влияние человеческого фактора на результаты измерений RS_1 ;
- обеспечить автоматическую регистрацию, протоколирование и сохранение полученных результатов измерения RS_1 ;
- максимально сократить время подготовки к работе при проведении многократных периодически повторяющихся измерений за счёт возможности разработки, корректировки и хранения управляющих программ для робота-манипулятора;
- определять RS_1 в заданных точках поверхностей произвольной геометрии;
- проводить измерения в режиме реального времени.

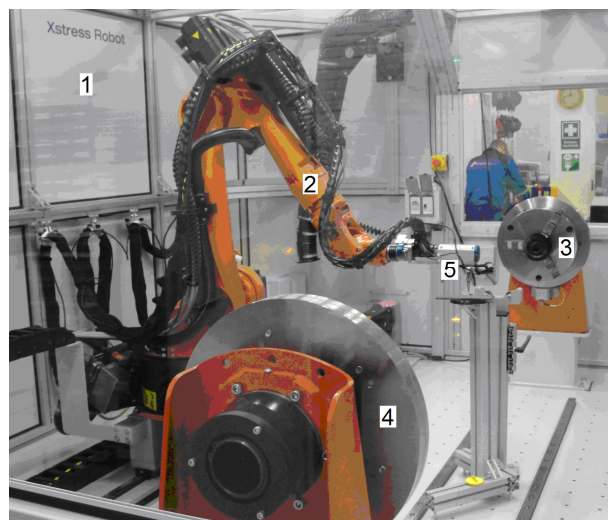


Рис. 1. Общий вид роботизированного комплекса:
1 – камера; 2 – робот-манипулятор; 3 – патрон;
4 – вращающийся центр; 5 – гониометр

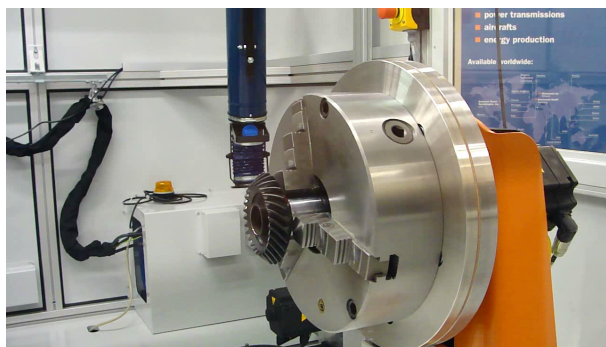


Рис. 2. Патрон с установленным коническим зубчатым колесом

Для измерения RS_1 в измерительном комплексе используется гониометр (рис. 3), установленный на консоли робота-манипулятора. Основные технические характеристики гониометра приведены в табл. 1.

Программное обеспечение, входящее в состав комплекса, позволяет определить главные нормальные напряжения для плоского напряженного состояния, реализуемого на поверхности деталей.

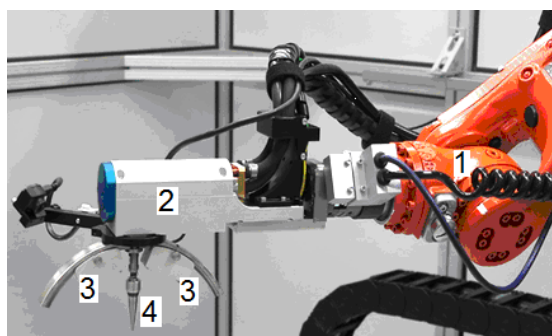


Рис. 3. Общий вид гониометра:
1 – консоль робота-манипулятора; 2 – головка гониометра; 3 – датчики рентгеновского излучения; 4 – коллиматор

Таблица 1

Технические характеристики гониометра

Параметр	Единица измерения	Величина
1. Точность позиционирования гониометра относительно точки измерения	мм	$\pm 0,003$
2. Угловое разрешение линейных датчиков изображения	град/пиксель	$0,014 \div 0,057$
3. Диапазон 2θ	град	$125 \div 162$
4. χ -наклон (программируемый)	град	$-60 \div +60$
5. χ -осцилляция (программируемая)	град	$0 \div \pm 6$
6. ϕ -осцилляции (с пошаговой регулировкой)	град	± 180
7. Тип рентгеновской трубки		Cr, Ti
8. Размер пятна, обеспечиваемый комплектом коллиматоров	мм	$1 \div 5$

Результаты исследования

Рассмотрим ряд примеров определения RS_1 в образцах и изделиях из различных материалов.

1. Определение RS_1 в плоских образцах из стали 45.

Образцы вырезались из листа толщиной 3 мм. Режимы термомеханической обработки образцов приведены в табл. 2. Измерение производилось в центральной части образцов. Схема измерений приведена на рис. 4. Результаты измерений для некоторых образцов приведены в табл. 3.

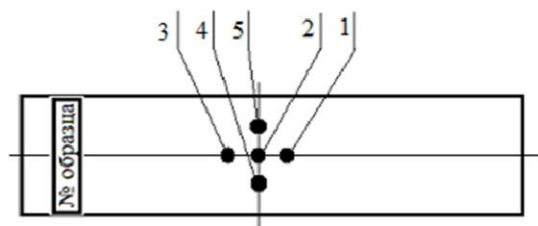


Рис. 4. Схема измерений (указаны номера точек измерения)

Таблица 2

Режимы механической обработки

Номер образца	Режимы обработки (до обработки – отпуск при температуре 300°C)
1	– шлифование: линейная скорость шлифовального круга 23,1 м/с
2	– шлифование: линейная скорость шлифовального круга 23,1 м/с; – полирование: линейная скорость полировального круга 23,6 м/с; полировочный компонент: паста ГОИ

Таблица 3

Результаты измерения остаточных напряжений

Номер образца	Точка измерения	σ_1 до обработки (после отпуска), МПа	σ_1 после обработки, МПа
1	1	$186 \pm 9,2$	$300,6 \pm 12,4$
	2	$230,7 \pm 12,6$	$281,9 \pm 14,8$
	3	$214,7 \pm 10,3$	$270,1 \pm 13,3$
	4	$189 \pm 14,6$	$285,1 \pm 13,3$
	5	$185,4 \pm 14,7$	$263,5 \pm 11,2$
2	1	$297,7 \pm 14,3$	$-159,1 \pm 5,4$
	2	$260 \pm 7,4$	$-188,2 \pm 7,2$
	3	$240,7 \pm 3,2$	$-181 \pm 8,3$
	4	$201,9 \pm 8,7$	$-168,1 \pm 7,9$
	5	$284 \pm 7,5$	$-181,3 \pm 8,9$

Анализ полученных результатов показывает, что, независимо от режимов, при шлифовании в поверхностных слоях образцов возникают растягивающие OH_1 , а при полировании – сжимающие. Последующая операция полирования после операции шлифовки способствует смене знака напряжений с положительного на отрицательный, что является благоприятным фактором. Таким образом, операцию полирования можно рекомендовать в качестве финишной.

2. Определение остаточных напряжений в стандартных образцах из сплава ВТ6 (рис. 5).

Образцы изготавливались из стандартного круглого проката на станке-автомате. Финишная операция – полирование.



Рис. 5. Образец для определения RS_1 в сплавах ВТ6

Результаты измерения $ОН_1$ представлены в табл. 4.

Таблица 4
Остаточные напряжения в стандартных образцах из сплава ВТ6

Номер образца	σ_2 , МПа		σ_3 , МПа	
	1-е измерение	2-е измерение	1-е измерение	2-е измерение
1	-98,8±19,8	-94,7±18,5	-320,7±19,8	-330,4±21,2
2	-164,1±22,7	-166,3±21,2	-322,3±22,7	-324,1±18,5
3	134,3±28,3	129,1±29,6	-419,1±28,3	-425,6±27,2
4	-146,5±21,6	-150,2±24,4	-330,0±21,6	-327,0±25,6

Результаты измерений подтверждает полученный ранее вывод о положительном влиянии операции полирования на знак $ОН_1$. Повторное измерение в той же точке дает схожие значения в пределах погрешности. На основании этого можно сделать вывод о том, что данный роботизированный комплекс обеспечивает повторяемость измерений.

3. Определение RS_1 на поверхности детали сложной формы (лопатка турбины ГТД).

Для позиционирования детали использовалось специальное приспособление (рис. 6).



Рис. 6. Закрепление лопатки турбины ГТД в специальном приспособлении

Измерения проводилось в точке перехода от пера к замку лопатки. Аналогичное исследование на данной лопатке проводилось в компании Stresstech Oy (Finland). Результаты измерения RS_1 приведены в табл. 5.

Таблица 5
Остаточные напряжения на пере лопатки

Точка	$\sigma_3(\varphi=0^\circ)$		FWHM	
	МПа	±МПа	МПа	±МПа
1	-752,7	150,3	-828	230

Анализируя данные об остаточных напряжениях в точке перехода от пера к замку лопатки, можно сделать вывод об унификации измерений по методу рентгеновской дифрактометрии при применении робота.

Выводы

1. Приведенные результаты показывают широкие возможности применения роботизированного измерительного комплекса для исследования влияния различных технологических операций на величину и знак остаточных макронапряжений.

2. Опыт авторов показывает, что существуют оптимальные режимы измерений по углу наклона и числу осцилляций гониометра, которые выбираются опытным путём и зависят от количества измерений и требований к точности результатов измерений.

3. Применение роботизированного комплекса обеспечивает повторяемость результатов и унификацию технологии измерений на различных видах и типоразмерах деталей.

4. Результаты исследований могут использоваться при создании баз данных и математических моделей для проектирования вновь разрабатываемых технологических процессов, а также для оптимизации существующих технологических процессов.

Работы выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор № 02G25.31.0016) в рамках реализации Постановления Правительства РФ №218.

Список литературы

1. Outeiro J.C., Umbrello D., M'Saoubi R. Experimental and numerical modelling of the residual stresses induced in orthogonal cutting of AISI 316L steel // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2006, vol. 46 (14), pp. 1786–1794.
2. Создание методики моделирования остаточных напряжений в поверхностном слое пера лопатки и расчет деформации пера лопатки после снятия слоя с остаточными напряжениями / Смирнов Г.В., Демин М.В., Смелое В.Т., Артамонов М.Ю. // Вестник Самарского государственного аэрокосмического уни-

- верситета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2006. № 2–1. С. 94–99.
3. Рукавишников И.В. Разработка средств и метода магнитных шумов для контроля остаточных напряжений в стойках шасси летательных аппаратов: дис. ... канд. техн. наук. М., 2006.
 4. Апальков А.А. Исследование остаточных напряжений в элементах конструкций ЯЭУ методом сверления отверстий и цифровой спекл интерферометрии: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.03. М., 2005. 173 с.

5. Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ: учеб. пособие для вузов. М.: МИСиС, 2002. 360 с.
6. Трофимов В.В., Башкарев А.Я., Краус И. Рентгеновская тензометрия – это так просто // В мире неразрушающего контроля. 2005. №1(27), С. 28–32.
7. Хренов Н.Н. Основы комплексной диагностики северных трубопроводов. Наземные исследования. М.: Газойл пресс, 2005. 608 с.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

EXPERIENCE IN APPLICATION OF THE XSTRESS ROBOT SYSTEM TO MEASURE TECHNOLOGICAL RESIDUAL STRESSES

Karmanov Vadim Vladimirovich – D.Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of Innovative Manufacturing Engineering, Perm National Research Polytechnic University, Russia. Phone: +7 (342) 239-15-08. E-mail: karmanovs@yandex.ru.

Trofimov Viktor Nikolaevich – D.Sc. (Eng.), Professor, Perm National Research Polytechnic University, Russia. Phone: +7 (342) 239-13-49. E-mail: tvn_perm@pstu.ru.

Nurtdinov Anton Sergeevich – Postgraduate Student, Perm National Research Polytechnic University, Russia. Phone: +7 (342) 239-15-08. E-mail: anton.nurtdinov@gmail.com.

Zvonov Sergey Nikolaevich – Ph.D. (Eng.), Director of LLC KSENA, Perm, Russia. Phone: +7 (342) 218-21-95. E-mail: info@kcena.ru.

Abstract. The article describes the experience in application of the robot system to measure technological residual stresses. The substantiation of the stress measurement method by X-ray diffractometry is shown. A description of the robot system is given. A description and results of measurement of flat and round samples, complex parts are given. Conclusions about the superiority of the robot systems used for the residual stresses control are made.

Keywords: residual stresses, robot system, measurement, X-ray diffractometry.

References

1. Outeiro J.C., Umbrello D., M'Saoubi R. Experimental and numerical modelling of the residual stresses induced in orthogonal cutting of AISI 316L steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006, no. 46 (14), pp. 1786-1794.
2. Smirnov G.V., Demin M.V., Smeloe V.T., Artamonov M.Yu. Sozdanie metodiki modelirovaniya ostatochnykh napryazheniy v poverkhnostnom sloe pera lopatki i raschet deformatsii pera lopatki posle snyatiya sloya s ostatochnymi napryazheniyami [Establishment of a simulation procedure for residual stress on the surface of the gas-turbine engine blades and determination of blade deformation after removal of the surface with residual stress]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S.P. Koroleva (natsionalnogo issledovatel'skogo*

universiteta) [Bulletin of Academician Korolev Samara State Aerospace University], 2006, no. 2-1, pp.94-99.

3. Rukavishnikov I.V. *Razrabotka sredstv i metoda magnitnykh шумов dlya kontrolya ostatochnykh napryazheniy v stoykakh shassi letatelnykh apparatov* [Development of the means and methods of magnetic noise control of residual stresses in landing gear of aircraft]. Ph.D. dissertation. Moscow, 2006.
4. Apalkov A.A. *Issledovanie ostatochnykh napryazheniy v elementakh konstruksii YaEU metodom sverleniya otverstiy i tsifrovoy spekl interferometrii* [Investigation of residual stresses in NPP structural elements by drilling holes and digital speckle interferometry]. Ph.D. dissertation. Moscow, 2005, 173 p.
5. Gorelik S.S., Skakov Yu.A., Rastorguev L.N. *Rentgenograficheskii i elektronno-opticheskiy analiz* [X-ray and electron-optical analysis]. Moscow: MISIS, 2002, 360 p.
6. Trofimov V.V., Bashkarev A.Ya., Kraus I. *Rentgenovskaya tenzometriya - eto tak prosto* [X-ray strain measurement - it's so simple]. *V mire nerazrushayushchego kontrolya* [In the world of non-destructive testing], 2005, no. 1 (27), pp. 28-32.
7. Khrenov N.N. *Osnovy kompleksnoy diagnostiki severnykh truboprovodov* [Fundamentals of comprehensive diagnostics of northern pipelines]. *Nazemnye issledovaniya* [Ground survey]. Moscow: Gasoil Press, 2005, 608 p.

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ

УДК 669.24.056.9:004+539.211+669.74

РЕКОНСТРУКЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ (111) НИКЕЛЯ В СПЛАВАХ $\text{Ni}_{20-x}\text{Mn}_x$

Вяткин Г.П., Морозов С.И.

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

Аннотация. Работа посвящена компьютерному моделированию поверхности сплавов на основе Ni первопринципными методами. Получены модели поверхности сплавов Ni(111), рассчитаны их физические свойства: релаксация, поверхностная энергия, работа выхода. Исследовано влияние расположения атомов Mn на эти характеристики.

Ключевые слова: моделирование, первопринципные методы, поверхность, никель, марганец, сегрегация, релаксация.

Введение

Поиск новых материалов, обладающих заданными свойствами, является одной из постоянных проблем современной физической химии и материаловедения. При обнаружении перспективных направлений количество научных как теоретических, так и экспериментальных работ, связанных с ними, резко возрастает. Подобное явление наблюдается в последнее десятилетие и с углеродными нанотрубками, и с нановолокнами. Повсеместному использованию их уникальных свойств в промышленности, однако, мешает отсутствие доступной и дешевой технологии управляемого роста (синтеза) этих объектов. Для ее создания активно и продуктивно используются различные металлические катализаторы. В экспериментальной работе [1] отмечается, что как получаемое количество нанотрубок, так и характер их роста существенно зависит от используемой поверхности-катализатора Ni, Fe, Co. Для объяснения этого явления уже предложено несколько моделей (механизмов) роста углеродных нанотрубок (механизм карбидного цикла, модель твердая-фаза-жидкость-твердая фаза). Их ключевым моментом является характер взаимодействия атомов углерода с поверхностными атомами. К сожалению, применение экспериментальных методов для изучения такого взаимодействия затруднено, но использование современных методов компьютерного моделирования из первых принципов позволяет исследовать его подробно и надежно. Согласно [2] в

настоящее время число теоретических работ по изучению адсорбции атомов углерода на поверхности Ni и Fe невелико, при этом иногда они имеют противоречивый характер [3].

В настоящей работе проведены расчеты энергетики и структур моделей исследуемых поверхностных слоев сплавов $\text{Ni}_{20-x}\text{Mn}_x$, которые в дальнейшем предполагается применить для изучения механизма взаимодействия атомов углерода, водорода и фрагментов молекул метана с поверхностью этих катализаторов.

Метод

Вычисления проводились с использованием лицензионной программы ab-initio расчета полной энергии и молекулярной динамики VASP (Vienna ab-initio simulation program), разработанной факультетом физики Университета Вены [4, 5].

Расчет электронной структуры атомов выполнялся в рамках теории функционала электронной плотности (DFT) с использованием базиса плоских волн и формализма PAW, потенциалов обменно-коррекционного функционала PBE (Пердью-Бурке-Эрнцсхофа). Энергия обрезания базиса плоских волн была выбрана равной 500 eV.

В качестве модели исследования использовалась суперячейка (рис. 1) размерностью $2 \times 2 \times 5$ (5 слоев по 4 атома в слое). Атомы первого и второго слоя, для корректного воспроизведения электронной структуры объема, были зафиксированы в равновесных «идеальных» позициях объемной решетки, атомы других «верхних» слоев могли релаксировать. Толщина вакуумного слоя состав-

ляла 10 Å, что исключало взаимодействие поверхностей из-за граничных условий. Интегрирование в зоне Бриллюэна выполнялось по методу Монкхорста-Пака для К-сетки $9 \times 9 \times 1$.

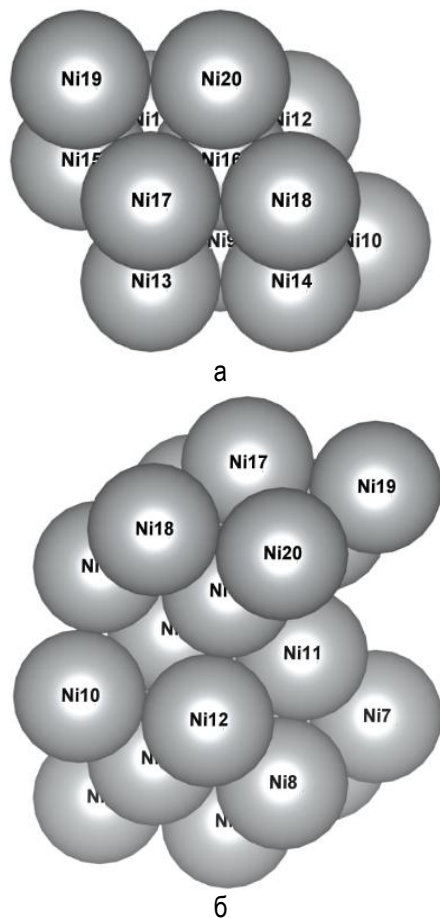


Рис. 1. Модель исследуемой поверхности Ni (111): а – вид сверху; б – вид сбоку

Релаксация получаемых структур проводилась методом сопряженных градиентов до достижения критериев сходимости по полной энергии системы менее 10^{-5} эВ и до величины остаточной силы, действующей на ион, менее 10^{-3} эВ/Å. Используемые значения параметров расчетной схемы были достаточны для обеспечения надежности результатов.

Для обозначения положения атомов Mn используется нумерация атомов Ni в ячейке. Для построения моделей использовалась программа VESTA [6].

Результаты и их обсуждение

В качестве исходной для исследования была принята оптимизированная модель Ni(111), в которой, последовательно, один атом Ni в позициях с 9 по 20, в которых разрешена «релаксация», замещался атомом Mn. Полученные значения полной энергии структур и их отличие от минимально возможной энергии представлены в табл. 1.

Таблица 1

Зависимость полной энергии структур $Ni_{11}Mn$ от расположения атома Mn

Положение атома Mn	Полная энергия, эВ	Приращение энергии, эВ
13	-108,17	0,00
14	-108,17	0,00
15	-108,17	0,00
16	-108,17	0,00
17	-108,07	0,10
18	-108,07	0,10
19	-108,07	0,10
20	-108,07	0,10
9	-108,04	0,13
10	-108,04	0,13
11	-108,04	0,13
12	-108,04	0,13

Наиболее энергетически выгодным является расположение атомов в четвертом слое в эквивалентных положениях 13, 14, 15, 16. В качестве исходной модели выбрана структура I с расположением атома Mn в положении 13 (рис. 2, а). Замещение атомов Ni атомами Mn меньше изменяет полную энергию (максимальное изменение 0,13 эВ), по сравнению с атомами Fe (0,19 эВ). Более того, размещение атомов Mn в поверхностном (пятом) слое более предпочтительно, по сравнению с размещением в третьем слое. В случае с атомами Fe наблюдалась обратная картина.

В дальнейшем в структуре I последовательно замещался атом Ni атомом марганца в положениях 9, 10, 11, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 и выполнялся расчет полной энергии полученных структур. Результаты расчета, упорядоченные по возрастанию энергий, представлены в табл. 2.

Наиболее выгодной является структура II с минимальной энергией (рис. 2, б), в которой атом Mn находится в третьем слое (положение 11), на максимально возможном удалении от атома 13. Отличие от сплавов $Ni_{18}Fe_2$ сохраняется. Размещение в поверхностном слое для атомов Mn является более предпочтительным, чем в четвертом. Размещение атома Mn в этом слое вызывает наибольшее изменение энергии 0,44 эВ (для Fe – 0,34 эВ).

Аналогичные изменения по размещению третьего атома Mn были произведены со структурой II. Результаты расчета полной энергии представлены в табл. 3.

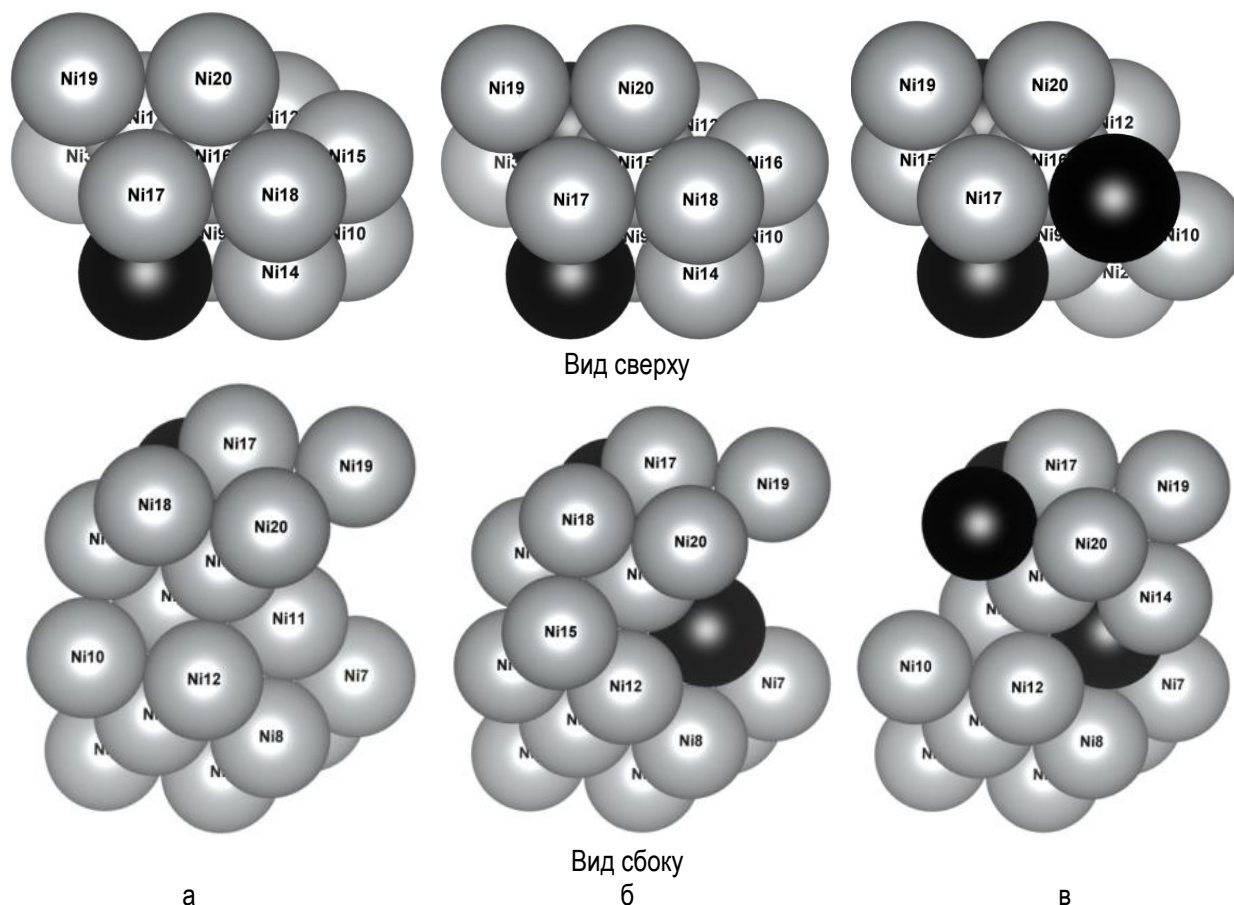


Рис. 2. Наиболее энергетически выгодные модели поверхностного слоя $Ni_{12-x}Mn_x$ (атомы Ni показаны серым цветом, атомы Mn – черным): а – $x=1$; б – $x=2$; в – $x=3$

Таблица 2
Зависимость полной энергии структур $Ni_{10}Mn_2$ от расположения атома Mn

Положение атомов Mn	Полная энергия, эВ	Приращение энергии, эВ
11	-112,01	0,00
18	-111,87	0,14
9	-111,82	0,19
10	-111,82	0,19
12	-111,82	0,19
17	-111,81	0,20
19	-111,81	0,20
20	-111,81	0,20
14	-111,57	0,44
15	-111,57	0,44
16	-111,57	0,44

Аналогичные изменения по размещению третьего атома Mn были произведены со структурой II. Результаты расчета полной энергии представлены в табл. 3.

Исходя из представленных расчетов, наиболее энергетически выгодной является структура

III (рис. 2, в), в которой третий атом размещен в положении 18 (пятый слой), на максимально возможном в данной модели удалении от атома соседнего слоя. Наибольшей энергией структура обладает при замещении атомов в третьем слое в положениях 9, 10, 12.

Таблица 3
Зависимость полной энергии структур Ni_9Mn_3 от расположения атома Mn

Положение атомов Mn	Полная энергия, эВ	Приращение энергии, эВ
18	-115,72	0,00
17	-115,61	0,11
19	-115,61	0,11
20	-115,61	0,11
14	-115,23	0,49
15	-115,23	0,49
16	-115,23	0,49
9	-115,10	0,62
10	-115,10	0,62
12	-115,10	0,62

По полученным моделям поверхностного слоя I, II и III были вычислены следующие физические характеристики (табл. 4): поверхностная энергия, работа выхода электронов, относительное изменение расстояния между слоями поверхности по отношению к расстояниям в объеме (релаксация поверхностного слоя), энергия Ферми.

Замена атома никеля атомом марганца приводит к изменению расстояний между слоями. Так, расстояние между вторым и третьим слоем в структурах I, II, III больше объемного расстояния, в то время как в чистом металле оно меньше. Добавление атома марганца приводит к последовательному увеличению расстояния между третьими и четвертым слоями модели.

В полученных моделях наблюдается уменьшение поверхностной энергии от 0,64 эВ (чистая поверхность Ni(111)) до 0,51 эВ (структура III).

Работа выхода электрона монотонно снижается от 4,69 эВ (чистая поверхность) до 4,52 эВ (структура III). Энергия Ферми также убывает. Средний магнитный момент атомов Ni и Mn не изменяется.

Для структуры I, II и III были рассчитаны плотности электронных состояний (рис. 3). Наличие атомов марганца приводит к их перераспределению. Так, последовательное увеличение количества атомов Mn приводит к уменьшению плотности состояний для относительных энергий $-3,8$; $-2,8$; $-0,2$ и $6,9$ эВ для конфигурации «спин вверх» и $-1,8$; $0,2$ и $7,0$ эВ для конфигурации «спин вниз».

Толщина линии показывает количество атомов Mn: самая тонкая линия соответствует «чистой» поверхности Ni (111), самая толстая – структуре с тремя атомами Mn.

Таблица 4

Характеристики моделей поверхности

Состав	Релаксация поверхностного слоя, %			Поверхностная энергия, эВ	Работа выхода электронов, эВ	Энергия Ферми E_F , эВ	Средний магнитный момент атомов	
	δ_{23}	δ_{34}	δ_{45}				Ni	Mn
Ni(111)	-0,32	-0,22	-1,45	0,64	4,69	3,02	0,66	
Ni ₁₁ Mn	0,05	0,92	-0,78	0,59	4,63	2,98	0,67	3,28
Ni ₁₀ Mn ₂	1,07	1,51	0,21	0,55	4,60	2,90	0,67	3,29
Ni ₉ Mn ₃	1,07	2,17	1,25	0,51	4,52	2,90	0,64	3,38

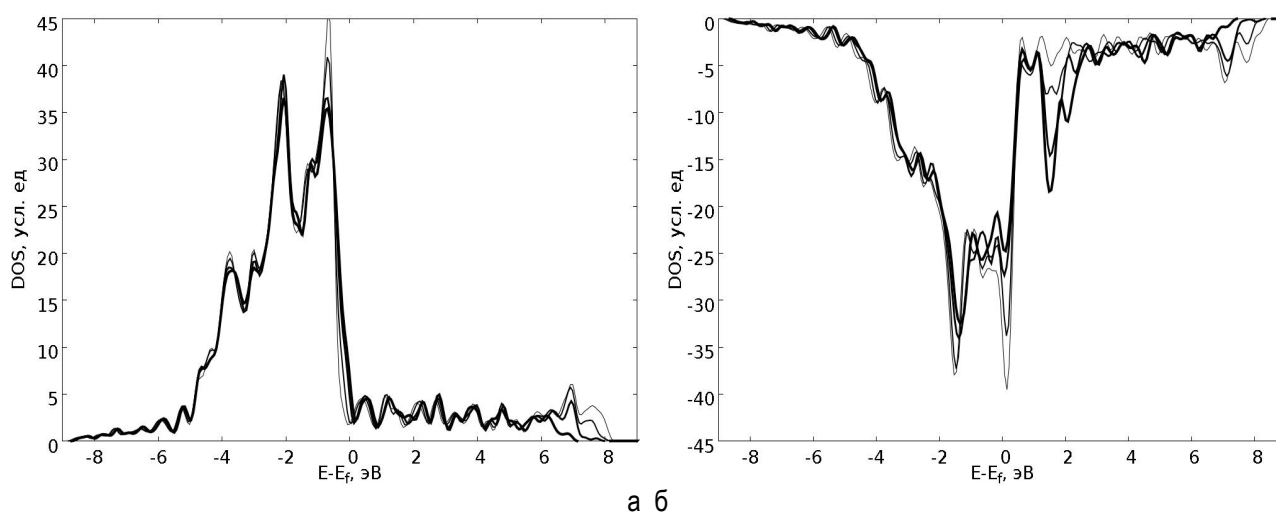


Рис. 3. Плотность электронных состояний исследуемых моделей:
а – спин «вверх»; б – спин «вниз»

Заключение

Выполненные расчеты в рамках теории функционала электронной плотности позволили получить модели поверхностных слоев сплавов Ni (111) с различным содержанием атомов Mn, которые в дальнейшем предполагается использовать для расчета энергий и геометрических параметров при адсорбции атомов и молекул. Выявлено влияние содержания атомов Mn в исследуемых моделях на изменение физических характеристик поверхностного слоя. Их увеличение приводит к снижению поверхностной энергии, изменению работы выхода, оптимизации расстояний между атомными слоями, вызывает изменение электронной структуры.

Наиболее энергетически выгодной для адсорбции частиц является структура III, содержащая три атома Mn, размещенных на максимальном удалении друг от друга в «верхних» слоях.

Авторы благодарят директора лаборатории суперкомпьютерного моделирования ЮУрГУ П.С. Костенецкого, директора суперкомпьютерного центра ЮУрГУ К.В. Бородулина за все-

стороннюю техническую поддержку при проведении исследований.

Список литературы

1. Исследование микроструктуры углеродного наноматериала, полученного на железо-никелевом катализаторе / Новикова А.А., Киселева Т.Ю., Тарасов Б.П., Мурадян В.Е. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2004. № 3. С. 70–73.
2. Мутигуллин И.В., Бажанов Д.И., Илюшин А.С. Влияние степени покрытия углеродом на возможность формирования твердого раствора внедрения в подповерхностном слое железа (001) и (111) // Физика твердого тела. 2011. Т. 53, вып. 3. С. 558–563.
3. Jonathan E. Mueller, Adri C.T. van Duin, and William A. Goddard III Structures, Energetics and Reaction Barriers for CH_x Bound to the Nickel (111) Surface // J. Phys. Chem. C. 2009, vol. 113, no. 47, pp. 20290–20306.
4. Kresse G., Furthmüller J. Efficient iterative schemes for ab initio total-energy calculations using a plane-wave basis set // Phys. Rev. B 54, 11169 (1996).
5. Kresse G., Joubert D. From ultrasoft pseudopotentials to the projector augmented-wave method // Phys. Rev. B 59, 1758 (1999).
6. Momma K., Izumi F. VESTA 3 for three-dimensional visualization of crystal, volumetric and morphology data // Appl. Crystallogr., 44, 1272–1276 (2011).

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

RECONSTRUCTION OF Ni (111) SURFACE OF Ni_{20-x}Mn_x ALLOYS

Viatkin German Platonovich – D.Sc. (Chemical), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Professor, President, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. Phone: +7 (351) 265 43 21.

Morozov Sergey Ivanovich – Ph.D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: morozov72@gmail.com.

Abstract. The paper is dedicated to the computer simulation of a surface of Ni-based alloys by first-principles methods. The models of the surface of Ni(111) alloys were found, their physical properties (relaxation, surface energy, work function) were calculated. The influence of manganese atom positions on these characteristics was researched.

Keywords: simulation, first-principles methods, surface, nickel, manganese, segregation, relaxation.

References

1. Novikova A.A., Kiseleva T.Yu., Tarasov B.P., Muradyan V.E. Issledovanie mikrostruktury uglerodnogo nanomateriala, poluchennogo na zhelezo-nikelevom katalizatore [Research of a microstructure of carbon nanomaterial produced on the iron-nickel catalyst]. *Poverhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neitronnye issledovaniya* [Surface. X-ray, synchrotron and neutron research], 2004, no. 3, pp. 70–73.

2. Mutigullin I.V., Bazhanov D.I., Ilyushin A.S. Vliyaniye stepeni pokrytiya uglerodom na vozmozhnost formirovaniya tverdogo rastvora vnedreniya v podpoverkhnostnom sloe zheleza (001) i (111) [Effect of a degree of a carbon coating on formation of an interstitial solution in a subsurface layer of iron (001) and (111)]. *Fizika tverdogo tela* [Solid state physics], 2011, vol. 53, iss. 3, pp. 558–563.
3. Jonathan E. Mueller, Adri C.T. van Duin, and William A. Goddard III. Structures, Energetics and Reaction Barriers for CH_x Bound to the Nickel (111) Surface. *J. Phys. Chem. C*. 2009, vol. 113, no. 47, pp. 20290–20306.
4. Kresse G., Furthmüller J. Efficient iterative schemes for ab initio total-energy calculations using a plane-wave basis set. *Phys. Rev. B* 54, 11169 (1996).
5. Kresse G., Joubert D. From ultrasoft pseudopotentials to the projector augmented-wave method. *Phys. Rev. B* 59, 1758 (1999).
6. Momma K., Izumi F. VESTA 3 for three-dimensional visualization of crystal, volumetric and morphology data. *J. Appl. Crystallogr.*, 44, 1272–1276 (2011).

УДК 669.018.58.017

МИКРОРЕНТГЕНОСПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В ВЫСОКОПРОЧНЫХ ИНВАРНЫХ СПЛАВАХ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТОВ РАСКИСЛЕНИЯ

Копцева Н.В.¹, Ефимова Ю.Ю.¹, Чукин Д.М.¹, Голубчик Э.М.¹, Дабала М.²¹ Магнитогорский государственный технический университет им Г.И. Носова, Россия² Департамент индустриальной инженерии Университета г. Падуа, Италия

Аннотация. Представлены результаты исследований микроструктуры методами световой и растровой электронной микроскопии (РЭМ) и микрорентгеноспектрального анализа неметаллических включений в высокопрочных инварных сплавах, раскисленных по различным вариантам. Предложен наиболее пригодный химический состав раскисляющей смеси.

Ключевые слова: высокопрочные инвары, раскисление, неметаллические включения, микрорентгеноспектральный анализ.

Введение

Передовой мировой опыт развития техники и технологий показывает, что одним из приоритетных направлений в настоящее время является разработка и внедрение новых наукоемких технологий и материалов, в том числе высокопрочных сплавов, обладающих комплексом уникальных свойств, а также создание изделий на их основе. Примером подобных материалов могут служить высокопрочные железоникелевые инварные сплавы, потребность в которых в последнее время повышается. Значительную долю рынка таких сплавов занимают инвары с заданной низкой величиной температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР). Однако низкие механические свойства затрудняют их использование в высоконагруженных или крупногабаритных конструкциях.

Для исследуемого типа сплавов одной из вредных примесей является кислород, который попадает в материал в процессе выплавки [1]. Он присутствует в металле как в растворенном виде, так и в виде оксидных неметаллических включений и снижает некоторые, необходимые конечному изделию, свойства [2]. В связи с этим большое значение приобретает операция раскисления и выбор эффективного варианта раскислителя, без которого невозможно достигнуть заданных высоких значений механических свойств конечного продукта. Получение готового сплава с минимальным содержанием кислорода является основной задачей раскисления.

В отечественной и зарубежной литературе достаточно подробно изучены физико-химические основы процессов раскисления железоникелевых сплавов [1–4]. Однако этих данных оказалось недостаточно для выбора вариан-

та раскислителя для экспериментальных плавов высокопрочных инварных сплавов с более сложным химическим составом [5, 6].

Целью данного исследования является выбор варианта раскисления на основе изучения неметаллических включений в микроструктуре инварных высокопрочных сплавов, раскисленных при выплавке по различным вариантам.

Материал и методика исследования

Химический состав исследуемых сплавов представлен в **таблице**.

Химический состав прутков экспериментальных плавов на основе систем Fe-Ni-Co-C, Fe-Ni-V-C, Fe-Ni-V-Mo-C

Номер плавки	Маркировка сплава	Массовая доля элементов, %					
		Fe	Ni	Co	V	C	Mo
A-4484	30НУК	ост	30,5	5,0	–	0,6	–
17219	32НУФК	ост	32,1	4,5	1,2	0,5	–
31536	32НУМ	ост	33,2	–	–	0,60	3,40
31538	34НУФМ	ост	34,7	–	1,0	0,40	2,30

Опытные плавки были выплавлены в вакуумной индукционной печи. Исходя из химического состава экспериментальных плавов, литературных данных о процессе раскисления железоникелевых сплавов и опыта изготовления инварных сплавов, были выбраны следующие варианты раскисляющих составов:

- 1) 0,1% Al, 0,2% Si и 0,1% Mn;
- 2) 0,2% Mn и 0,5% Ti;
- 3) 0,2% Si, 0,2% Mn и 0,2% SiCa;
- 4) 0,1%Al, 0,2%Si, 0,1%Mn и 0,35%NiMg (0,15%Mg);
- 5) 0,15% Mn_{раф}, 0,35% NiMg (0,15% Mg), 0,1%

$\text{Si}_{\text{кр}}$, 0,1% SiCa, 0,06% Al и $0,07 \div 0,1\%$ $\text{Ti}_{\text{губка}}$.

Для анализа микроструктуры сплавов были изготовлены шлифы, которые исследовались методом световой микроскопии на микроскопе Meiji Techno и растровой электронной микроскопии (РЭМ) на микроскопе JSM 6490 LV. Для идентификации химических элементов, входящих в состав структурных составляющих сплавов, был проведен микрорентгеноспектральный анализ (МРСА) с использованием специальной приставки к сканирующему микроскопу – системы INCA Energy.

Результаты и их обсуждение

Структура всех исследованных сплавов представляла собой матрицу с включениями различных размеров и типов (рис. 1). Результаты МРСА показали, что в спектрах, полученных от металлической основы (матрицы) образцов, во всех сплавах обнаруживаются пики Fe, Ni, и C, а также Co – в сплавах 30НУК и 32НУФК, незначительное количество Mo – в сплавах 32НУМ и

34НУФМ и V – в сплавах 32НУФК и 34НУФМ (рис. 2). Это позволяет идентифицировать матрицу сплавов как твердый раствор, содержащий указанные элементы. В сплавах на основе системы Fe-Ni-C такой твердый раствор является γ -твердым раствором с ГЦК-решеткой [7].

В спектрах, полученных с темных частиц преимущественно глобулярной формы, которые наблюдались во всех сплавах, обнаруживается наличие ряда элементов, характерных для неметаллических включений металлургического происхождения, а их округлая форма подтверждает, что они выделились из расплава.

В спектрах, снятых с темных включений, подобных указанному на рис. 3, а, присутствуют пики Mn и S (рис. 3, б). Это свидетельствует, что марганец, входящий во все раскисляющие составы, связывает серу и присутствует в структуре сплавов в виде сульфидов, количество которых во всех исследованных сплавах невелико (см., например, рис. 1).

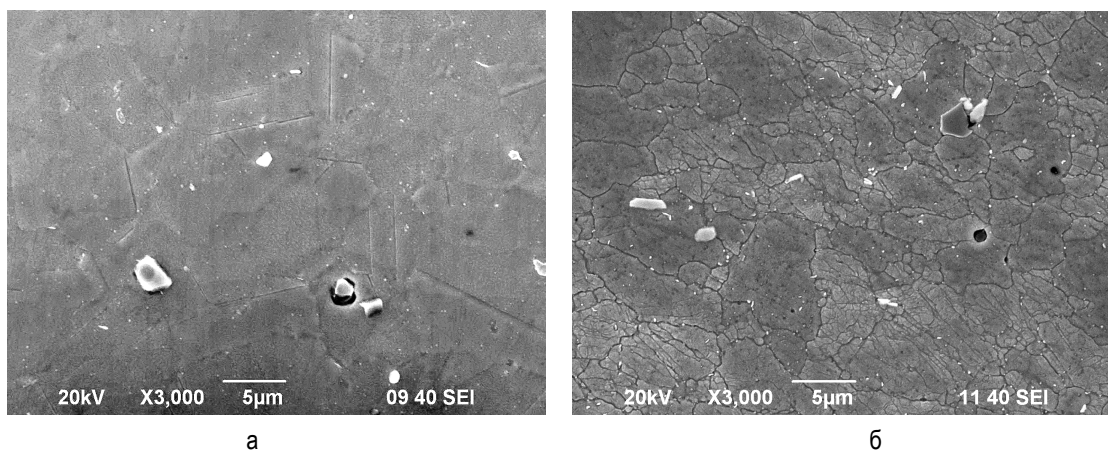


Рис. 1. Типичный вид микроструктуры исследованных сплавов: а – легированных кобальтом (30НУК); б – легированных молибденом (32НУМ)

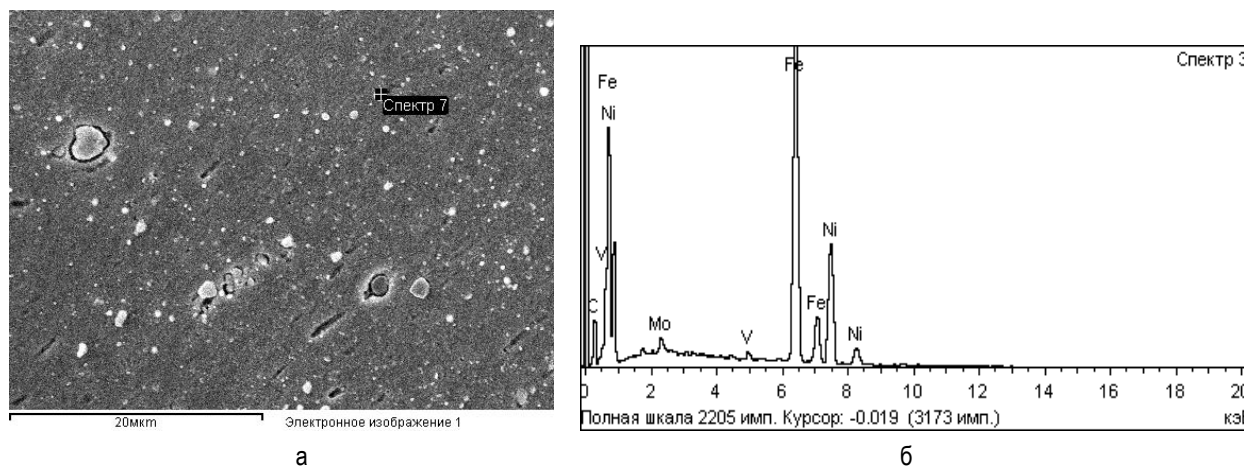


Рис. 2. Электронное изображение структуры сплава 34НУФМ (а) и микрорентгеновский спектр, снятый с матрицы (б)

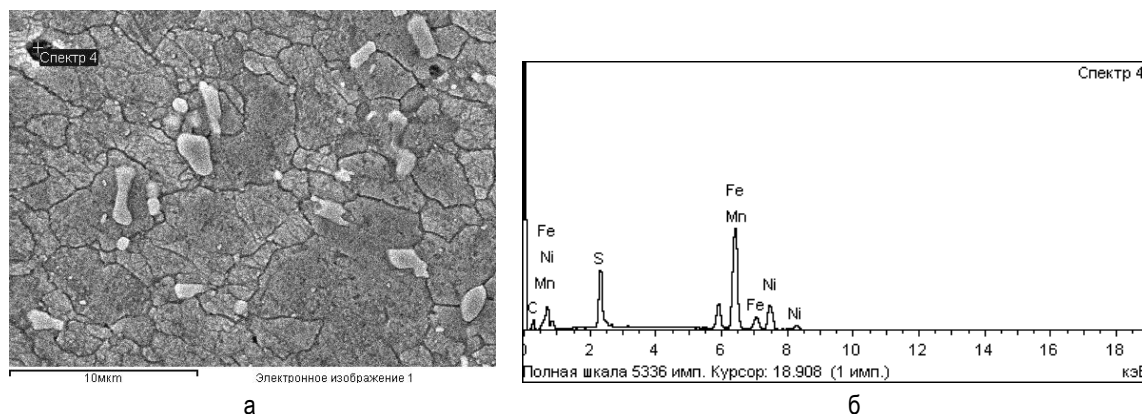


Рис. 3. Электронное изображение исследуемого участка структуры сплава 32НУМ (а), раскисленного по варианту 2, и микрорентгеновский спектр (б), снятый с указанной частицы

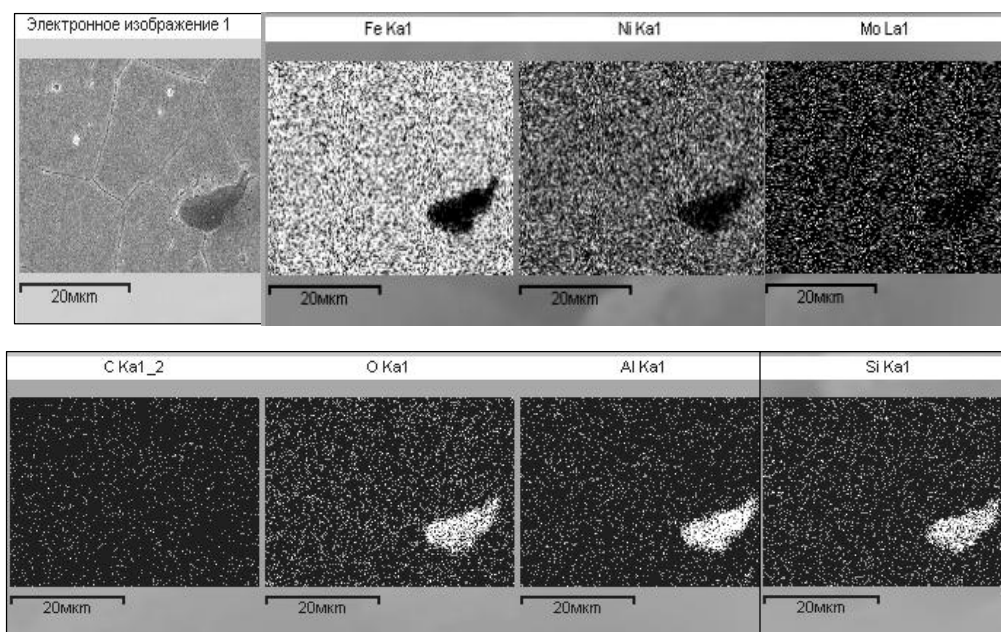


Рис. 4. Электронное изображение неметаллических включений в микроструктуре сплава 34НУФМ, раскисленного по варианту 4, и картины распределения Fe, Ni, Mo, C, O, Al и Si

В сплавах, которые были раскислены раскислителем состава 0,1–0,2% Mn и $\leq 0,1\%$ Al (вариант 1), раскислителем состава 0,2% Si, 0,2% Mn и 0,2% SiCa (вариант 3) и раскислителем состава 0,1% Al, 0,2% Si, 0,1% Mn и 0,35% NiMg (0,15% Mg) (вариант 4), обнаруживается большое количество частиц неметаллических включений. МРСА выявил наличие в их составе кислорода, а карты распределения химических элементов показали, что в этих частицах помимо кислорода присутствуют такие элементы, как Si и Al (в зависимости от состава раскислителя) и практически отсутствуют C, Fe, Ni, Mo, V, Co, Ti и Mn (рис. 4). Это свидетельствует о том, что при раскислении указанными составами раскислителей в исследуемых сплавах имеется большое количество оксидных неметаллических включений, размеры которых составляют от 1 до 20 мкм. Особенно много оксидных включений при этом было обнару-

жено в сплаве 30НУК, которые в некоторых случаях располагаются в виде крупных включений и сетки по границам зерен (рис. 5).

Полученные данные свидетельствуют о недостаточно эффективном раскислении исследуемых сплавов при использовании раскисляющих составов по вариантам 1, 3 и 4.

В сплавах, раскисленных по варианту 5 (0,15% Mn_{граф}, 0,35% NiMg (0,15% Mg), 0,1% Si_{кр}, 0,1% SiCa, 0,06% Al и 0,07–0,1% Ti_{губка}), обнаруживаются неметаллические включения глобулярной формы, в составе которых, как показал МРСА, присутствуют Ti, Mg, Al и O (рис. 6). Это позволяет отнести подобные частицы к сложным оксидам – шпинелям. Однако размеры этих частиц, в отличие от частиц, обнаруженных при раскислении другими составами, преимущественно не превышают 1,5 мкм.

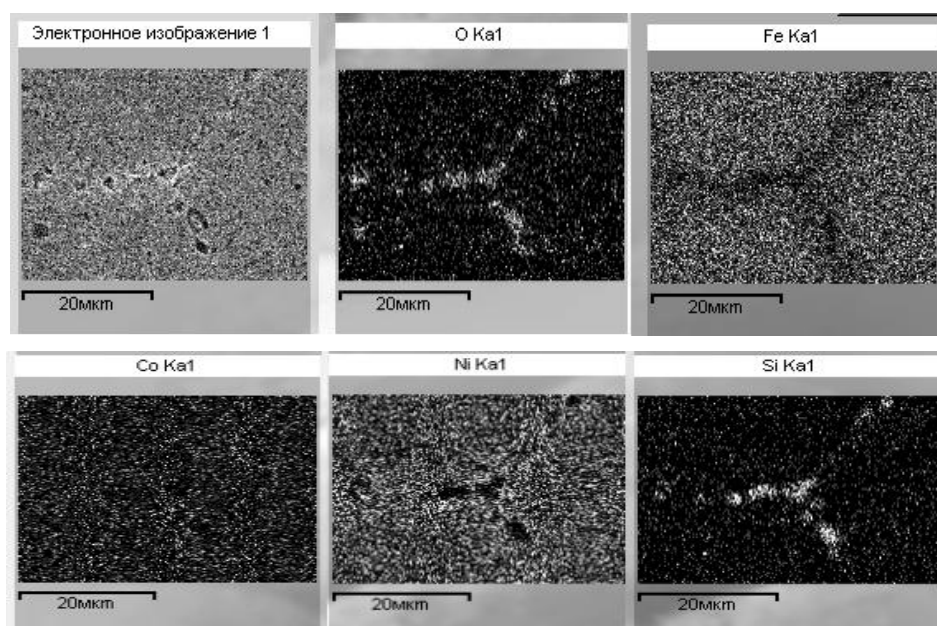


Рис. 5. Электронное изображение сетки неметаллических включений в микроструктуре сплава 30НУК, раскисленного по варианту 3 (а), и картины распределения О, Fe, Co, Ni и Si (б)

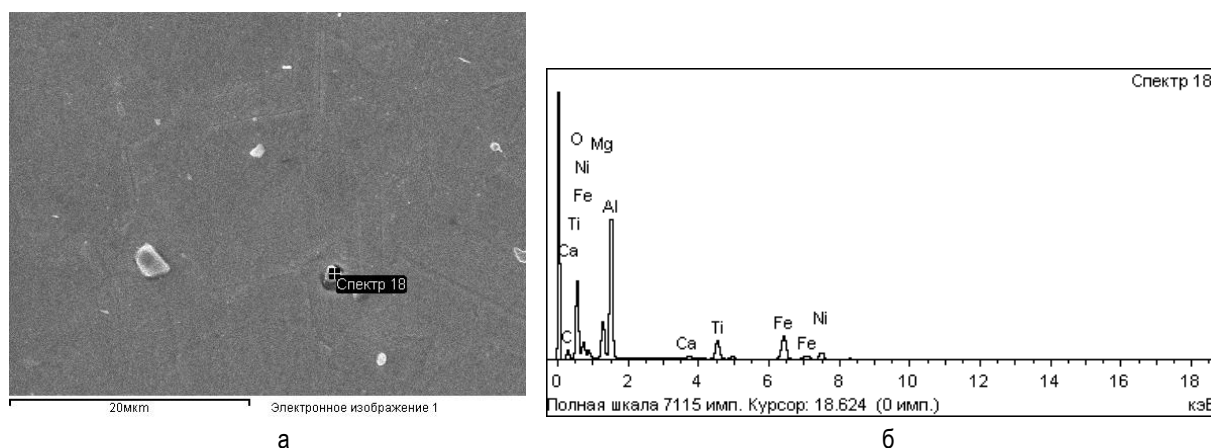


Рис. 6. Электронное изображение исследуемого участка структуры сплава 32НУК (а), раскисленного по варианту 2, и микрорентгеновский спектр (б), снятый с указанной частицы

В сплавах, раскисленных по вариантам 2 и 5, в неметаллических частицах также обнаруживается Ti, который входит в состав раскисляющих смесей (см., например, рис. 6), причем содержание Ti в этих включениях незначительно и не превышает 3%. Следует отметить, что Ti, являясь сильным карбидообразующим элементом, кроме того, участвует в карбидообразовании, присутствуя в карбидных частицах в количестве до 17–35% в комплексе с V и/или Mo в зависимости от состава сплава. Это, как известно, существенно улучшает морфологию и распределения карбидной фазы и снижает ее склонность к коагуляции при высоких температурах [8], а следовательно, может играть важную роль в формировании свойств высокопрочных инваров [9]. Однако при

большем содержании титана в составе раскислителя возможно увеличение количества крупных карбидных частиц, что нежелательно.

Заключение

Таким образом, на основании анализа результатов электронно-микроскопического и микрорентгеновского исследования можно сделать заключение, что с позиций формирования удовлетворительного фазового состава и количества неметаллических включений наиболее пригодной является раскисляющая смесь состава (вариант 5): 0,15% Mn_{раф}, 0,35% NiMg (0,15% Mg), 0,1% Si_{кр}, 0,1% SiCa, 0,06% Al и 0,07–0,1% Ti_{губка}.

Работа проведена в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, выполняемого с участием российского высшего учебного заведения (договор № 02.G25.31.0040) и государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации № 11.1525.2014.

Список литературы

- Куликов И.С. Раскисление сплавов. М.: Metallurgiya, 1975. 504 с.
- Самарин А.М. Физико-химические основы раскисления стали. М.: Изд-во АН СССР, 1956. 152 с.
- Steelmaking Data Sourcebook. N.Y. Tokyo: Gordon & Breach Science Publ. 1988. 325 p.
- Прецизионные сплавы: справочник / под ред. Б.В. Молотилова. М.: Metallurgiya, 1983. 438 с.
- Разработка композиций многофункциональных сплавов инварного класса с расширенными эксплуатационными характеристиками / Чукин М.В., Голубчик Э.М., Кузнецова А.С., Родионов Ю.Л., Кормс И.А., Касаткин А.В., Подузов Д.П. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. № 3 (43). С. 62–66.
- Исследование физико-механических свойств и структуры высокопрочных многофункциональных сплавов инварного класса нового поколения / Чукин М.В., Голубчик Э.М., Гун Г.С., Копцева Н.В., Ефимова Ю.Ю., Чукин Д.М., Матушкин А.Н. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 1 (45). С. 43–47.
- Захаров А.И. Физика прецизионных сплавов с особыми тепловыми свойствами. М.: Metallurgiya, 1986. 97 с.
- Стормс Э. Тугоплавкие карбиды: пер. с англ. М.: Атомиздат, 1970. 304 с.
- Исследование режимов термической обработки при производстве высокопрочных инварных сплавов нового поколения / Чукин М.В., Копцева Н.В., Голубчик Э.М., Чукин Д.М., Медведева Е.М. // Metallurg. 2014. № 4. С. 97–101.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

ELECTRON MICROPROBE ANALYSIS OF NONMETALLIC INCLUSIONS IN HIGH-STRENGTH INVAR ALLOYS OBTAINED USING VARIOUS EMBODIMENTS OF DEOXIDIZATION

Koptseva Natalia Vasilyevna – D.Sc. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia.

Efimova Yuliya Yuryevna – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia.

Chukin Dmitriy Mikhailovich – Postgraduate Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia.

Golubchik Eduard Mikhailovich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. E-mail: golub66@mail.ru.

Dabala Manuele – Professor at the Department of Industrial Engineering of Padova University, Italy.

Abstract. The results of the microstructure examination by light and scanning electron microscopy (SEM) and electron microprobe analysis of nonmetallic inclusions in high-strength invar alloys, deoxidized on various embodiments, are presented. The most suitable chemical composition of deoxidizing mixture is proposed.

Keywords: invar alloys, deoxidization, nonmetallic inclusions, electron microprobe analysis.

References

- Kulikov I.S. *Raskislenie splavov* [Alloys deoxidation]. Moscow: Metallurgiya, 1975. 504 p.
- Samarin A.M. *Fiziko-khimicheskie osnovy raskisleniya stali* [Physical-chemical basis of steel deoxidation]. Moscow: AN USSR, 1956, 152 p.
- Steelmaking Data Sourcebook. N.Y. Tokyo: Gordon & Breach Science Publ. 1988. 325 p.
- Pretsizionnye splavy: Spravochnik; pod red. B.V. Molotilova* [Precision Alloys. Handbook edited by B.V. Molotilov]. Moscow: Metallurgiya, 1983, 438 p.
- Chukin M.V., Golubchik E.M., Kuznetsova A.S., Rodionov Yu.L., Korms I.A., Kasatkin A.V., Poduzov D.P. *Razrabotka kompozitsii mnogofunktsionalnykh splavov invarnogo klassa s rasshirennyimi ekspluatatsionnymi kharakteristikami. Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2013, no. 3(43), pp. 62-66.
- Chukin M.V., Golubchik E.M., Gun G.S., Koptseva N.V., Efimova Yu.Yu., Chukin D.M., Matushkin A.N. *Issledovanie fiziko-mekhanicheskikh svoistv i struktury vysokoprochnykh mnogofunktsionalnykh splavov invarnogo klassa novogo pokoleniya. Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2014, no. 1(45), pp. 43-47.
- Zakharov A.I. *Fizika pretsizionnykh splavov s osobymi teplovymi svoistvami* [Physics of precision alloys with special thermal properties]. Moscow: Metallurgiya. 1986. 97 p.
- Storms E. *Tugoplavkie karbidy* [Refractory carbides]. Translated from English. Moscow: Atomizdat, 1970. 304 p.
- Chukin M.V., Koptseva N.V., Golubchik E.M., Chukin D.M., Medvedeva E.M. *Issledovanie rezhimov termicheskoy obrabotki pri proizvodstve vysokoprochnykh invarnykh splavov novogo pokoleniya* [Investigation of heat treatment conditions in the production of high-strength invar alloys of a new generation]. *Metallurg* [Metallurgist]. 2014, no. 4, pp.97-101.

СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

УДК 330.341.1

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ТРАНСФОРМИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ S-ОБРАЗНЫХ КРИВЫХ РАЗВИТИЯ

Рубин Г.Ш., Полякова М.А., Гун Г.С.

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

Аннотация. На основе свойств S-образных кривых развития разработана математическая модель прогнозирования изменения какого-либо показателя системы во времени. Приведены математические уравнения, позволяющие рассчитать периоды ускоренного и замедленного развития показателя. Данный математический аппарат является эффективным способом прогнозирования динамики роста показателя и определения временных промежутков процесса.

Ключевые слова: S-образная кривая развития, прогнозирование, показатель, математическая модель, динамика роста.

Введение

Среди существующих приемов прогнозирования развития технических систем особое место занимают методы, основанные на использовании законов развития технических систем [1]. Законы развития технических систем, на которых базируются все основные механизмы решения изобретательских задач, впервые сформулированы Г.С. Альтшуллером [2–4 и др.]. Согласно данному подходу технические системы (независимо от своего назначения) последовательно проходят в своем развитии три этапа: медленное нарастание, быстрый лавинообразный рост и стабилизация одной из главных эксплуатационных характеристик системы. Кривая, построенная в осях координат, где по вертикали откладывается численное значение одной из эксплуатационных характеристик, а по горизонтали – «возраст» технической системы или затраты на ее развитие, получила название S-образной линии жизни технической системы. S-кривая является иллюстрацией качественного развития технической системы (рис. 1) [2]. Понятие «Идеальность», предложенное Г.С. Альтшуллером, обобщенно отражает уровень развития технической системы, степень ее технического совершенства.

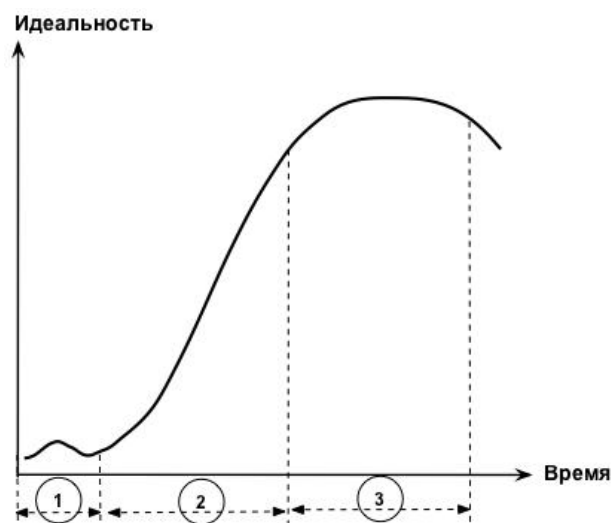


Рис. 1. S-образная кривая развития систем:

- 1 этап – рождение и «детство» системы;
- 2 этап – интенсивное развитие системы, достижение «зрелости»;
- 3 этап – период снижения роста, стабилизации и снижения характеристик, «старости»

В экономике, техническом прогнозировании широко применяется моделирование динамики различных процессов в виде S-образных кривых [5, 6] (рис. 2).

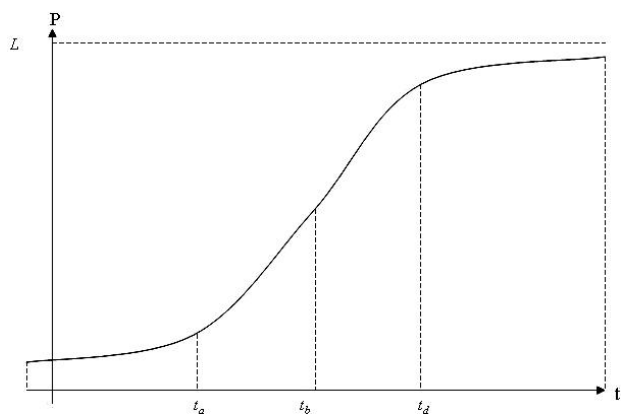


Рис. 2. S-образная динамика изменения показателя P во времени

Для таких кривых характерно:

1) асимптотическое стремление к 0 (или другому нижнему пределу) при уменьшении времени t и стремление к некоторому верхнему пределу L с ростом времени;

2) наличие периода ускоренного роста – до момента t_b ;

3) наличие периода замедления роста – после момента t_b .

Следует отметить, что такой вид имеют и ряд зависимостей между техническими параметрами. Исследованием таких зависимостей авторы данной статьи занимаются в настоящее время и надеются вскоре опубликовать их результаты. Для описания этих зависимостей используются уравнения Перла-Рида, Гамперца и другие

$$P = \frac{L}{1 + ae^{-bt}}, \quad (1)$$

где P – показатель системы; L – предельное значение показателя; a , b – параметры; t – время.

Эти формулы получены как решения дифференциальных уравнений, описывающих развитие популяций живых организмов. Обоснования правомерности использования этих формул основано на некоторых аналогиях между биологическими, с одной стороны, и экономическими и техническими процессами, с другой стороны [2].

Однако для прогнозирования развития системы необходимо разработать математическую модель, позволяющую определить динамику развития системы. Одним из недостатков существующих подходов [7–9] является отсутствие в математической модели начала и конца процесса. В реальных процессах, развивающихся в конечный промежуток времени, невозможно интерпретировать асимптотическое стремление к какой-либо величине. Это снижает возможность использования модели, в частности, для прогнозирования

исследуемых процессов. Эти соображения вызвали потребность разработать другую математическую модель S-образных зависимостей.

Теория и методы исследования

Введём обозначения и сформулируем основные требования к такой модели (рис. 3). Обозначим интервал времени развития процесса $[t_0, t_f]$, соответствующие значения исследуемого показателя

$$P(t_0) = P_0, \quad P(t_f) = P_f. \quad (2)$$

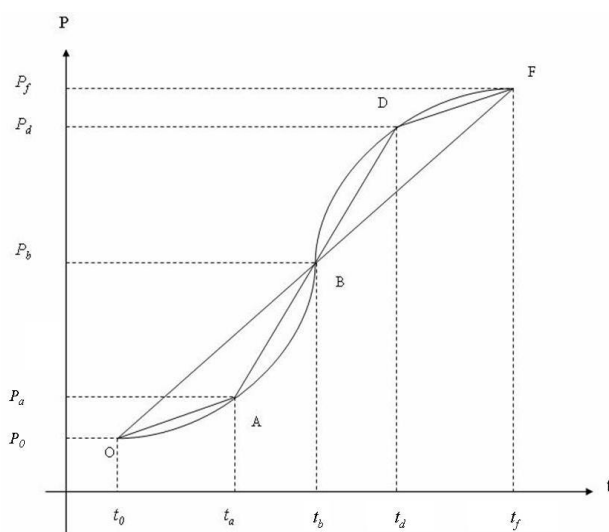


Рис. 3. Элементы S-образной динамики

Мы считаем функцию $P(t)$ возрастающей. Возможен и симметричный случай, когда показатель убывает от начального к конечному моменту времени. Трансформация всех выкладок при этом носит только технический характер.

Скорость изменения показателя вблизи границ интервала снижается до 0

$$\frac{dP}{dt} \Big|_{t=t_0} = \frac{dP}{dt} \Big|_{t=t_f} = 0 \quad (3)$$

и увеличивается по мере удаления от граничных значений

$$\begin{aligned} \frac{d^2P}{dt^2} &= a, \quad t_0 \leq t \leq t_b, \\ \frac{d^2P}{dt^2} &= -b, \quad t_b \leq t \leq t_f, \end{aligned} \quad (4)$$

где $a \geq 0$, $b \geq 0$ – ускорение и замедление темпов роста соответственно; t_b – граница периодов ускорения и замедления роста показателя.

Тогда

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dt} &= at + C_1, \quad t_0 \leq t \leq t_b; \\ \frac{dP}{dt} &= -bt + C_2, \quad t_b \leq t \leq t_f, \end{aligned} \quad (5)$$

а с учётом (3)

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dt} &= a(t - t_0), \quad t_0 \leq t \leq t_b; \\ \frac{dP}{dt} &= b(t_f - t), \quad t_b \leq t \leq t_f. \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} P(t) &= 0,5a(t - t_0)^2 + C_3, \quad t_0 \leq t \leq t_b; \\ P(t) &= -0,5b(t_f - t)^2 + C_4, \quad t_b \leq t \leq t_f. \end{aligned} \quad (7)$$

С учётом (2)

$$\begin{aligned} P(t) &= 0,5a(t - t_0)^2 + P_0, \quad t_0 \leq t \leq t_b; \\ P(t) &= -0,5b(t_f - t)^2 + P_f, \quad t_b \leq t \leq t_f. \end{aligned} \quad (8)$$

С-образный характер изменения показателя подразумевает непрерывность его изменения (непрерывность графика) и плавность роста (отсутствие изломов кривой), т.е. непрерывность скорости роста (непрерывность первой производной). Это обеспечивается непрерывностью показателя и его первой производной по времени в точке t_b , т.е.

$$P(t_b - 0) = P(t_b + 0), \text{ и } \left. \frac{dP}{dt} \right|_{t=t_b-0} = \left. \frac{dP}{dt} \right|_{t=t_b+0}. \quad (9)$$

Из этих условий получаем систему двух уравнений

$$\begin{cases} 0,5a(t_b - t_0)^2 + P_0 = -0,5b(t_f - t_b)^2 + P_f; \\ a(t_b - t_0) = b(t_f - t_b), \end{cases} \quad (10)$$

неизвестными в которых являются a, b, t_2 . Очевидно, два уравнения (10) позволяют определить два из неизвестных параметров при известном третьем.

Результаты и обсуждение

Прежде всего, отметим важные, хотя и достаточно очевидные, соотношения, следующие из уравнений (10):

$$\frac{a}{b} = \frac{t_f - t_b}{t_b - t_0}, \quad (11)$$

т.е. периоды ускоренного и замедленного развития обратно пропорциональны величинам ускорения и замедления. Кроме того

$$2(P_f - P_0) = b(t_f - t_b)^2 + a(t_b - t_0)^2, \quad (12)$$

что даёт оценку роста показателя за весь период развития.

Для дальнейшего анализа считаем известным момент времени t_b . Тогда

$$a = \frac{V}{t_b - t_0}; \quad b = \frac{V}{t_f - t_b}, \quad (13)$$

где $V = \frac{P_f - P_0}{t_f - t_0}$ – средняя скорость роста показателя за период исследования.

$$\begin{aligned} P(t) &= V \frac{(t - t_0)^2}{t_b - t_0} + P_0, \quad t_0 \leq t \leq t_b; \\ P(t) &= -V \frac{(t_f - t)^2}{t_f - t_b} + P_f, \quad t_b \leq t \leq t_f. \end{aligned} \quad (14)$$

Знание скорости роста v или значение показателя P в некоторый момент времени t позволяет определить величину ускорения a или замедления b , а следовательно, и всю траекторию изменения показателя на соответствующем интервале времени

$$\begin{aligned} a &= \frac{P - P_0}{(t - t_0)^2}, \quad a = \frac{v}{t - t_0}, \quad t_0 \leq t \leq t_b; \\ b &= \frac{P_f - P}{t_f - t}, \quad b = \frac{v}{t_f - t}, \quad t_b \leq t \leq t_f. \end{aligned} \quad (15)$$

Тогда можно, зная начальные (t_0, P_0) или конечные (t_f, P_f) параметры траектории, определить точку перегиба (перехода от ускорения к замедлению):

$$\begin{aligned} t_b &= \frac{v}{a} + t_0, \quad t_0 \leq t \leq t_b; \\ t_b &= -\frac{v}{b} + t_f, \quad t_b \leq t \leq t_f \end{aligned} \quad (16)$$

Из (14) следует

$$P(t_b) = V(t_b - t_0) + P_0, \quad (17)$$

следовательно,

$$\frac{P(t_b) - P_0}{t_b - t_0} = V = \frac{P_f - P_0}{t_f - t_0}, \quad (18)$$

т.е. точки О, В и F (см. рис. 3) лежат на одной прямой.

На практике интерес представляют моменты времени t_a и t_b , в которых $v=V$. В реальных временных рядах, имеющих несистематическую случайную погрешность, эти точки, в отличие от других, можно определить с достаточной степенью достоверности. Отметим, что из (14) следует

$$\left. \frac{dP}{dt} \right|_{t=t_a} = 2V \frac{t_a - t_0}{t_b - t_0}, \quad 2V \frac{t_a - t_0}{t_b - t_0} = V, \quad (19)$$

$$t_a - t_0 = 0,5(t_b - t_0),$$

т.е. точка t_a является серединой отрезка $[t_0, t_b]$.

Точно так же доказывается, что точка t_b является серединой отрезка $[t_b, t_f]$. Из этого следует, что

$$P_b - P_0 = 4(P_a - P_0) \text{ и } P_f - P_b = 4(P_f - P_d). \quad (20)$$

Проведённый анализ позволяет предложить следующий алгоритм анализа временного ряда, имеющего S-образную форму.

1. Точка t_b определяется как точка, в которой скорость роста показателя справа от неё меньше, чем слева:

$$\frac{P_b - \Delta P}{\Delta t} > \frac{P_b + \Delta P}{\Delta t}. \quad (21)$$

2. Знание t_b и P_b позволяет, используя (18), определить среднюю скорость V .

3. Знание V даёт возможность зафиксировать момент t_d и величину P_d .

4. После этого в соответствии с (19) и (20) можно прогнозировать окончание S-образного процесса, который наступит в момент времени

$$t_d + (t_d - t_b) \text{ на уровне } P_d + \frac{1}{3}(P_d - P_b). \quad (22)$$

Таким образом, модель развития процесса (14), построенная на предположениях (2), (3), (4) и (9), даёт эффективный способ прогнозирования динамики роста показателя и временных промежутков процесса.

В заключение отметим, что легко доказать принадлежность точек А, В и D одной прямой. Это позволяет аппроксимировать процесс в виде ломаной линии OABDF и использовать достаточно простые линейные зависимости для практических расчётов.

Выводы

Особую актуальность приобретают вопросы прогнозирования развития на современном этапе смены технологических укладов. Современный этап развития характеризуется интенсивным развитием нанотехнологий, которые являются ключевым фактором шестого технологического уклада [10–33]. С другой стороны, неравномерное развитие различных отраслей промышленности, рыночные отношения, необходимость быстро реагировать на изменение потребностей и спроса потребителей требуют математически обоснованного определения момента времени внедрения инновационных разработок в действующее промышленное производство. С этой точки зрения предлагаемый математический аппарат представляет практический интерес для прогнозирования развития процессов.

Список литературы

1. Кынин А., Привень А. Прогноз возможных путей развития технических систем (качественный прогноз). URL: http://www.bash.ru/files/kinin_privnen_prognoz-putey-vozmojnogo-razvitiya-ts.pdf (дата обращения: 19.11.2014).
2. Альтшуллер Г.С. Творчество как точная наука: теория решения изобретательских задач. М.: Сов. радио, 1979. 184 с. (Кибернетика).
3. Альтшуллер Г.С. О законах развития технических систем. Баку, 20.01.1977. URL: <http://www.altshuller.ru/triz/zrts1.asp>.
4. Альтшуллер Г.С., Селюцкий А.Б. Крылья для Икара: Как решать изобретательские задачи. Петрозаводск: Карелия, 1980. 224 с.
5. Мартино Дж. Технологическое прогнозирование: пер. с англ. (Technological Forecasting for Decisionmaking NEW YORK – 1972). М.: Прогресс, 1977. 592 с.
6. Рубин М. Мифы о законах развития технических систем. 2009. URL: <http://www.temm.ru/ru/section.php?docId=4384> (дата обращения: 10.07.2014).
7. Формальная (математическая) интерпретация эволюционных и революционных процессов. URL: <http://lektiopedia.org/lek-21425.html> (дата обращения: 19.11.2014).
8. Моделирование S-образного роста. URL: <http://www.nicemanager.ru/doijs-208-1.html> (дата обращения: 19.11.2014).
9. Старцев Ю.Н. S-образные модели развития и технологические разрывы. URL: <http://www.lib.csu.ru/vch/128/010.pdf> (дата обращения: 19.11.2014).
10. Нанотехнологии как ключевой фактор нового технологического уклада в экономике / под ред. акад. РАН Глазьева С.Ю. и проф. Харитонова В.В. М.: Тривант, 2009. 304 с.
11. Инновационный потенциал новых технологий производства метизных изделий из наноструктурных сталей / Чукин М.В., Копцева Н.В., Барышников М.П., Ефимова Ю.Ю., Носов А.Д., Носков Е.П., Коломиец Б.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2009. № 2. С. 64–68.

12. Пат. 2446027 РФ, МПК В21С 1/00, В21J 5/06, С21D 7/00. Способ получения длинномерных заготовок круглого поперечного сечения с ультрамелкозернистой структурой / Чукин М.В., Емалеева Д.Г., Барышников М.П., Полякова М.А. Оpubл. 27.03.2012. Бюл. №9.
13. Пат. 2467816 RU, МПК В21С 1/04, В21С 1/00. Способ получения ультрамелкозернистых полуфабрикатов волочением с кручением / Чукин М.В., Полякова М.А., Голубчик Э.М., Рудаков В.П., Носков С.Е., Гулин А.Е. Заявл. 28.02.2011; опубл. 27.11.2012, Бюл. № 33.
14. Гун Г.С., Чукин М.В., Рубин Г.Ш. Управление качеством в метизном производстве // *Металлургические процессы и оборудование*. 2013. №4. С. 106-112.
15. Рубин Г.Ш., Полякова М.А. Развитие научных основ стандартизации // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2014. № 1. С. 97 – 102.
16. Разработка теории квалиметрии метизного производства / Рубин Г.Ш., Чукин М.В., Гун Г.С., Закиров Д.М. // *Черные металлы*. 2012, июль. С. 15–21.
17. Гун Г.С. Инновационные методы и решения в процессах обработки материалов // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2014. № 4(48). С. 99–113.
18. Генезис научных исследований в области качества металлопродукции / Г.С. Гун, И.Ю. Мезин, Г.Ш. Рубин, А.А. Минаев, А.Е. Назайбеков, Х. Дыя // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2014. № 1 (45). С. 92–97.
19. Научно-педагогическая школа Магнитогорского государственного технического университета по управлению качеством продукции и производственных процессов / Г.С. Гун, И.Ю. Мезин, А.Г. Корчунов, М.В. Чукин, И.Г. Гун, Г.Ш. Рубин // *Качество в обработке материалов*. 2014. № 1. С. 5–8.
20. Протипология – новый этап развития стандартизации метизного производства / Г.Ш. Рубин, М.А. Полякова, М.В. Чукин, Г.С. Гун // *Сталь*. 2013. № 10. С. 84–87.
21. Nanodimensional in high carbon steel structural part formation by thermal and deformation processing / Chukin M.V., Korchunov A.G., Gun G.S., Polyakova M.A., Koptseva N.V. // *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2013. № 5 (45). P. 33–35.
22. Metallurgy qualimetry theory design and development / G.S. Gun, G.Sh. Rubin, M.V. Chukin, I.G. Gun, I.U. Mezin, A.G. Korchunov // *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2013. № 5 (45). P. 67–69.
23. Управление качеством продукции в технологиях метизного производства: монография / Корчунов А.Г., Чукин М.В., Гун Г.С., Полякова М.А. М.: Издательский дом «Руда и металлы», 2012. 164 с.
24. Перспективы производства высокопрочной стальной арматуры из высокоуглеродистых марок стали / Чукин М.В., Гун Г.С., Корчунов А.Г., Полякова М.А. // *Черные металлы*. 2012. №12. С. 8–16.
25. Высокопрочная арматура для железобетонных шпал нового поколения / Ушаков С.Н., Чукин М.В., Гун Г.С., Корчунов А.Г., Полякова М.А. // *Путь и путевое хозяйство*. 2012. №11. С. 25–27.
26. Особенности реологических свойств конструкционных наносталей / Чукин М.В., Гун Г.С., Барышников М.П., Валиев Р.З., Рааб Г.И. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2008. №1. С. 24–27.
27. Эффективные процессы получения фасонных профилей / Токарь В.С., Гостев А.А., Гун И.Г., Гайдабур В.В., Гун Г.С., Шеркунов В.Г. Магнитогорск, 1994.
28. Производство стальной проволоки / Белалов Х.Н., Клековкина Н.А., Клековкин А.А., Никифоров Б.А., Гун Г.С., Корчунов А.Г., Зюзин В.И., Кулеша В.А., Савельев Е.В. Белалов Х.Н. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. 2005.
29. Ресурсосбережение в метизном производстве / Гун Г.С. // *Теория и практика работы Белорецкого металлургического комбината: коллективная монография*. Магнитогорск, 2001.
30. 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. Магнитогорск, 1999.
31. Рубин Г.Ш., Гун Г.С., Пудов Е.А. Комплексная оценка качества стальной канатной проволоки // *Сталь*. 1983. №1. С. 56.
32. Научная деятельность ГОУ ВПО «МГТУ» в условиях развития нанотехнологий / Чукин М.В., Колокольцев В.М., Гун Г.С., Салганик В.М., Платов С.И. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2009. №2. С. 55–59.
33. Производство высокопрочной стальной арматуры для железобетонных шпал нового поколения / Чукин М.В., Корчунов А.Г., Бакшинов В.А. и др.; под. общ. ред. М.В. Чукина. Москва, 2014.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

MODELING OF THE TECHNOLOGICAL TRANSFORMATION BASED ON S-SHAPE CURVES OF DEVELOPMENT

Rubin Gennadiy Shmulievich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. E-mail: rubingsh@gmail.com.

Polyakova Marina Andreevna – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. E-mail: m.polyakova-64@mail.ru.

Gun Gennadiy Semenovich – D.Sc. (Eng.), Adviser to the Rector, Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. Phone: +7 (3519) 29-85-26. E-mail: mgtnu@magtu.ru.

Abstract. A forecasting mathematical model for any system indicator changing in time is created based on properties of S-shape curves. Mathematical equations, which may be used for determination of indicator accelerating and decelerating development periods, are given. This mathematical approach is an efficient way of indicator growth dynamics forecasting and process time intervals determination.

Keywords: S-shape curve of development, forecasting, indicator, mathematical model, growth dynamics.

References

1. Kynin A., Priven A. Forecasting (qualitative forecasting) of probable ways of technical systems development. URL: http://www.bash.ru/files/kinin_priven_prognoz-putey-vozmojnogo-razvitiya-ts.pdf. Accessed on 19 November 2014.
2. Altshuller G.S. *Tvorchestvo kak tochnaya nauka: teoriya resheniya izobretatel'skikh zadach* [Creative work as an exact sci-

- ence: the theory of inventive problem solving]. Moscow: Sov. radio, 1979, 184 p, Kibernetika.
3. Altshuller G.S. About technical systems development laws. Baku, 20.01.1977. <http://www.altshuller.ru/triz/zrts1.asp>.
 4. Altshuller G.S., Selyutskii A.B. *Kryl'ya dlya Ikar: Kak reshat' izobretenel'skie zadachi* [Wings for Ikar: how to solve inventive problems]. Petrozavodsk: Karelia, 1980, 224 p.
 5. Martino J. *Tekhnologicheskoe prognozirovanie: per. s angl.* [Technological forecasting. Trans. from English]. Moscow: Progress, 1977, 592 p.
 6. Rubin M. Myths about technical systems development laws. 2009. URL: <http://www.temm.ru/ru/section.php?docId=4384>. Accessed on 10 July 2014.
 7. Formal (mathematical) interpretation of evolutionary and revolutionary processes. URL: <http://lektsiopedia.org/lek-21425.html>. Accessed on 19 November 2014.
 8. S-shape growth modeling. URL: <http://www.nicemanagement.ru/doips-208-1.html>. Accessed on 19 November 2014.
 9. Startsev Yu.N. S-shape development models and technological gaps. URL: <http://www.lib.csu.ru/vch/128/010.pdf>. Accessed on 19 November 2014.
 10. *Nanotekhnologii kak klyuchevoy faktor novogo tekhnologicheskogo uklada v ehkonomie pod red. akad. RAN Glaz'eva S.YU. i prof. Kharitonova V.V.* [Nanotechnologies as a key factor of new technological setup in economics. Ed. by acad. of RAS Glaziev S.Yu. and prof. Kharitonov V.V.]. Moscow: Trovant, 2009, 304 p.
 11. Chukin M.V., Koptseva N.V., Baryshnikov M.P., Efimova Yu.Yu., Nosov A.D., Noskov E.P., Kolomiets B.A. The innovative potential of producing metalware from nanostructured steel. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2009, no. 2, pp. 64-68.
 12. Chukin M.V., Emaleeva D.G., Baryshnikov M.P., Polyakova M.A. *Sposob polucheniya dlinnomernykh zagotovok kruglogo poperechnogo secheniya s ul'tramelkozernistoy strukturoy* [A method of producing long round cross-sectional workpieces with an ultrafine grain structure]. Patent RF, no. 2446027, 2012.
 13. Chukin M.V., Polyakova M.A., Golubchik E.M., Rudakov V.P., Noskov S.E., Gulin A.E. *Sposob polucheniya ul'tramelkozernistykh polufabrikatov volocheniem s krucheniem* [Method of manufacturing ultrafine grain semi-finished products by drawing with twisting]. Patent RF, no. 2467816, 2012.
 14. Gun G.S., Chukin M.V., Rubin G.Sh. Quality management in metalware production. *Metallurgicheskie protsessy i oborudovaniya* [Metallurgical processes and equipment], 2013, no. 4, pp. 106-112.
 15. Rubin G.Sh., Polyakova M.A. Development of standardization scientific basis. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2014, no. 1, pp. 97-102.
 16. Rubin G.Sh., Chukin M.V., Gun G.S., Zakirov D.M. Development of metalware qualimetry theory. *Chernye metally* [Ferrous metals], 2012, July, pp. 15-21.
 17. Gun G.S. Innovative methods and solutions in materials forming processes. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2014, no. 4(48), pp.99-113.
 18. Gun G.S., Mezin I.Yu., Rubin G.Sh., Minaev A.A., Nazaybekov A.E., H. Dyja. The research genesis in the field of the steel products quality. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2014, no. 1 (45), pp. 92-97.
 19. Gun G.S., Mezin I.Yu., Korchunov A.G., Chukin M.V., Gun I.G., Rubin G.Sh. Educational research school of Nosov Magnitogorsk State Technical University in product and industrial process quality management. *Quality in materials processing*, 2014, no. 1, pp. 5-8.
 20. Rubin G.Sh., Polyakova M.A., Chukin M.V., Gun G.S. Protipology is the next stage of metalware standartization development. *Stal'* [Steel], 2013, no. 10, pp. 84-87.
 21. Chukin M.V., Korchunov A.G., Gun G.S., Polyakova M.A., Koptseva N.V. Nanodimensional in high carbon steel structural part formation by thermal and deformation processing. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2013, no. 5 (45), pp. 33-35.
 22. Gun G.S., Rubin G.Sh., Chukin M.V., Gun I.G., Mezin I.Yu., Korchunov A.G. Metallurgy qualimetry theory design and development. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2013, no. 5 (45), pp. 67-69.
 23. Korchunov A.G., Chukin M.V., Gun G.S., Polyakova M.A. *Upravlenie kachestvom produktsii v tekhnologiyakh metiznogo proizvodstva* [Quality management in metalware production technologies: monograph]. Moscow: Ore and metals, 2012, 164 p.
 24. Chukin M.V., Gun G.S., Korchunov A.G., Polyakova M.A. Outlook for producing high-strength steel reinforcement bars from high-carbon steel grades. *Ferrous metals*, 2012, no. 12, pp. 8-16.
 25. Ushakov S.N., Chukin M.V., Gun G.S., Korchunov A.G., Polyakova M.A. High-strength reinforcement bars for concrete sleepers of a new generation. *Railway track and equipment*, 2012, no. 11, pp. 25-27.
 26. Chukin M.V., Gun G.S., Baryshnikov M.P., Valiev P.Z., Raab G.I. Features of structural nanosteel rheological properties. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2008, no. 1, pp. 24-27.
 27. Tokar V.S., Gostev A.A., Gun I.G., Gaidabura V.V., Gun G.S., Sherkunov V.G. *Ehffektivnye protsessy polucheniya fazonnykh profilej* [Efficient processes of manufacturing shaped sections]. Magnitogorsk, 1994.
 28. Belalov Kh.N., Klekovkina N.A., Klekovkin A.A., Nikiforov B.A., Gun G.S., Korchunov A.G., Zyuzin V.I., Kulesha V.A., Saveliev E.V. *Proizvodstvo stal'noj provoloki* [Production of steel wire]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2005.
 29. Gun G.S. *Resursosberezhenie v metiznom proizvodstve. Teoriya i praktika raboty Beloretskogo metallurgicheskogo kombinata: kolektivnaya monografiya* [Resource saving in metalware production. Theory and practice of operation of the Beloretsk Iron and Steel Works: a multi-author monograph]. Magnitogorsk, 2001.
 30. Safronov M.F., Antipanov V.G., Rashnikov V.F., Afanasiev V.F., Kornilov V.L., Gun G.S., Shemshurova N.G. Roll production and operation at a metallurgical plant. Magnitogorsk, 1999, vol. 4.
 31. Rubin G.Sh., Gun G.S., Pudov E.A. An overall quality assessment of steel rope wire. *Steel*, 1983, no. 1, p. 56.
 32. Chukin M.V., Kolokoltsev V.M., Gun G.S., Salganik V.M., Platon S.I. Research of SEI HPE MSTU in a context of nanotechnology development. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2009, no. 2, pp. 55-59.
 33. Chukin M.V., Korchunov A.G., Bakshinov V.A. et al. Production of high-strength steel reinforcement bars for concrete sleepers of a new generation. Moscow, 2014.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

УДК 621.36

ПОВЕДЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ВАННЕ ДУГОВОЙ ПЕЧИ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ РАЗНОЙ КОНСТРУКЦИИ ТОКОПОДВОДЯЩЕЙ ШИНЫ К ПОДОВОМУ ЭЛЕКТРОДУ

Ячиков И.М., Портнова И.В.

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

Аннотация. Предложена математическая модель для определения магнитных полей вблизи токоподводов к подовому электроду дуговой печи постоянного тока (ДППТ) в виде винтовой линии, плоской или пространственной спирали Архимеда. Посредством компьютерного моделирования проанализированы напряженности магнитных полей в ванне ДППТ. Даны рекомендации по параметрам конструкции токоподводящей шины.

Ключевые слова: дуговая печь постоянного тока, магнитное поле, токоподвод.

Введение

В металлургической промышленности достаточно широко распространены технологии с использованием больших электрических токов, протекающих через ванну расплава. Типичными примерами являются электрометаллургия, электрошлаковый и вакуумно-дуговой переплав, где металлургические расплавы представляют собой высокотемпературные токонесущие жидкости. Их поведение описывается законами магнитной гидродинамики, связанными с явлениями, которые возникают при взаимодействии проходящего через расплав электрического тока с его собственным и внешним магнитными полями.

Внешние магнитные поля могут оказывать как положительное, так и отрицательное воздействие на технологические процессы. Так, при воздействии магнитного поля на токонесущий расплав, находящийся в ванне дуговой печи постоянного тока (ДППТ), с одной стороны, возникают объемные электромагнитные силы, приводящие к кондукционному его перемешиванию, что интенсифицирует протекание тепломассообменных процессов. С другой стороны, внешние магнитные поля могут приводить к возникновению интенсивных течений, вымывающих футеровку, к отклонению от вертикали дуги или характерному ее движению по поверхности жидкого расплава [1].

Отсюда грамотное использование кондукционного перемешивания позволяет повысить технико-экономические характеристики металлургического процесса, качество получаемого металла и свести к минимуму негативные воздействия.

Математическая модель и моделирование магнитных полей при разной конструкции токоподводящей шины к подовому электроду

Один из возможных способов управления процессом кондукционного перемешивания связан с изменением напряженности магнитного поля в разных областях токонесущего расплава ванны от внешних проводников с током. В патентах [2, 3] внешнее магнитное поле предлагается создавать шиной токоподвода к подовому электроду, выполненной в виде пространственной винтовой линии, имеющей один или несколько витков одного или разного диаметра или плоской спирали (рис. 1). Внутри винтовой линии может находиться сердечник из ферромагнитного материала, перемещая который в вертикальном и горизонтальном направлениях можно управлять изменением величины напряженности магнитного поля в разных областях токонесущего расплава ванны.

Сравнительная оценка силового воздействия на расплав в ванне ДППТ, имеющей один подовый электрод, смещенный относительно оси ванны, и токоподвод в виде плоского кольца, показала, что величины собственных и внешних магнитных полей одного порядка и оказывают примерно одинаковое силовое воздействие на расплав [4]. Установлено, что с помощью кондукционного перемешивания можно весьма существенно и гибко влиять на процессы в ванне расплава, кроме того, его можно использовать независимо или совместно с электровихревым перемешиванием.

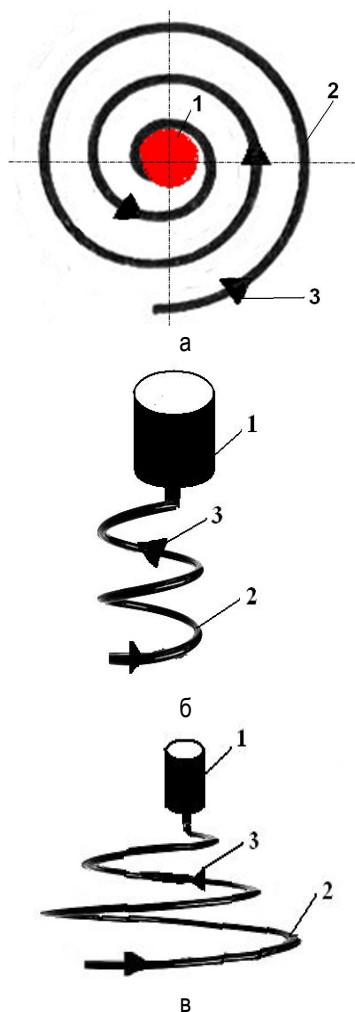


Рис. 1. Виды токоподводов к подовому электроду:
а – плоская спираль Архимеда;
б – цилиндрическая спираль;
в – пространственная спираль Архимеда;
1 – подовый электрод; 2 – жесткая токоподводящая шина; 3 – направление тока

Целью данной работы является изучение магнитного поля в ванне ДППТ при использовании токоподводящей шины к подовому электроду в форме винтовой линии либо в виде плоской или пространственной спирали Архимеда.

Рассмотрим магнитное поле, возникающее вблизи проводника в форме винтовой линии, по которому протекает ток I (рис. 2, а). Будем использовать цилиндрическую систему координат (r, φ, z) , связанную с декартовой (x, y, z) через соотношения: $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, $\varphi = \arctg(y/x)$. Зададим функцию линии проводника в параметрической форме $y(\varphi) = R_y \cdot \cos(\varphi)$, $x(\varphi) = R_y \cdot \sin(\varphi)$, $z(\varphi) = b \cdot \varphi / (2 \cdot \pi)$, где b – шаг винтовой линии, определяющий изменение координаты z при увеличении φ на $2 \cdot \pi$, R_y – радиус витка. Если винто-

вая линия имеет n витков, то ее длина $L_6 = n \sqrt{4\pi^2 R_y^2 + b^2}$.

Для определения напряженности магнитного поля в произвольной точке A от тока I , протекающего через элемент $d\vec{l}$ (точка B), воспользуемся уравнением Био-Савара-Лапласа в дифференциальной форме

$$d\vec{H} = \frac{I}{4\pi r^3} [d\vec{l} \cdot \vec{r}']. \quad (1)$$

Распишем координаты векторов $\vec{R}$, $\vec{R}_y$, $\vec{r}'$ (рис. 2, а) [5]:

$$O\vec{B} = \vec{R} = (R_y \cdot \cos\varphi, R_y \cdot \sin\varphi, z),$$

$$\vec{R}_y = (R_y \cdot \cos\varphi, R_y \cdot \sin\varphi),$$

$$A\vec{B} = \vec{r}' = (R_y \cdot \cos\varphi - x_0, R_y \cdot \sin\varphi - y_0, z - z_0),$$

$$d\vec{l} = d\varphi \cdot \left(R_y \cdot \sin\varphi, -R_y \cdot \cos\varphi, \frac{b}{2 \cdot \pi} \right) \dots$$

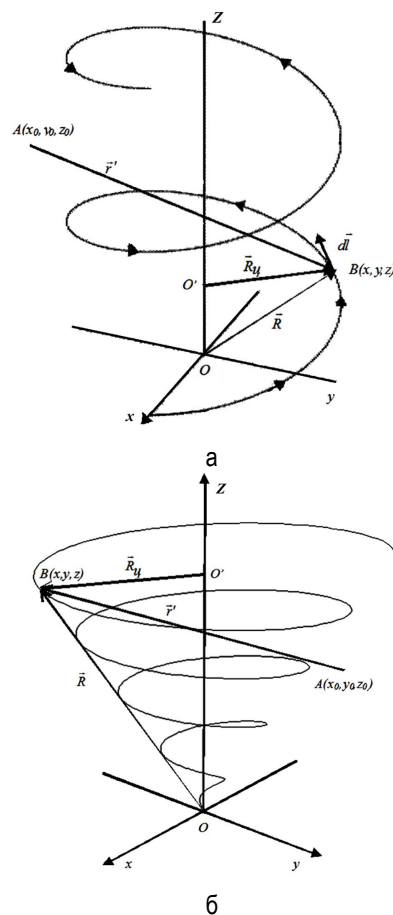


Рис. 2. К расчету напряженности магнитного поля от токоподводов, имеющих форму: а – пространственной винтовой линии; б – пространственной спирали Архимеда

В произвольной точке $A(r_0, \varphi_0, z_0)$, вблизи проводника с током в виде пространственной винтовой линии, содержащей n витков, декартовые проекции напряженности магнитного поля имеют вид:

$$H_x(r_0, \varphi_0, z_0) = \frac{I}{4\pi} \times \int_0^{2\pi n} \frac{-(R_y \sin \varphi - r_0 \sin \varphi_0) \cdot b / (2\pi) - R_y \cos \varphi \left(\frac{b\varphi}{2\pi} - z_0 \right)}{\left(R_y^2 + r_0^2 - 2R_y r_0 \cdot \cos(\varphi - \varphi_0) + \left(\frac{b\varphi}{2\pi} - z_0 \right)^2 \right)^{3/2}} d\varphi, \quad (2)$$

$$H_y(r_0, \varphi_0, z_0) = \frac{I}{4\pi} \times \int_0^{2\pi n} \frac{(R_y \cos \varphi - r_0 \cos \varphi_0) \cdot b / (2\pi) - R_y \sin \varphi \left(\frac{b\varphi}{2\pi} - z_0 \right)}{\left(R_y^2 + r_0^2 - 2R_y r_0 \cos(\varphi - \varphi_0) + \left(\frac{b\varphi}{2\pi} - z_0 \right)^2 \right)^{3/2}} d\varphi, \quad (3)$$

$$H_z(r_0, \varphi_0, z_0) = \frac{I \cdot R_y}{4\pi} \times \int_0^{2\pi n} \frac{R_y - r_0 \cos(\varphi - \varphi_0)}{\left(R_y^2 + r_0^2 - 2R_y r_0 \cos(\varphi - \varphi_0) + \left(\frac{b\varphi}{2\pi} - z_0 \right)^2 \right)^{3/2}} d\varphi. \quad (4)$$

В частном случае, при $b=0, n=1$ имеем математическую модель осесимметричного магнитного поля от кругового витка [4, 6]:

$$H_z(r_0, z_0) = \frac{I \cdot R_y}{4\pi} \times \int_0^{2\pi} \frac{R_y - r_0 \cdot \cos(\varphi)}{\left(R_y^2 + r_0^2 - 2R_y \cdot r_0 \cdot \cos(\varphi) + z_0^2 \right)^{3/2}} d\varphi, \quad (5)$$

$$H_x(r_0, \varphi_0, z_0) = \frac{I}{4 \cdot \pi} \cdot \int_0^{2\pi \times n} \frac{\lambda(\varphi) \cdot (\varphi \cdot \cos(\varphi) \cdot (z_0 - z) - (r_0 \cdot \sin \varphi_0 - a \cdot \varphi \cdot \sin \varphi) \cdot b / (2 \cdot \pi))}{\left(a^2 \cdot \varphi^2 + r_0^2 - 2 \cdot a \cdot f \cdot r_0 \cdot \cos(\varphi - \varphi_0) + (z - z_0)^2 \right)^{3/2}} d\varphi, \quad (7)$$

$$H_y(r_0, \varphi_0, z_0) = \frac{I}{4 \cdot \pi} \cdot \int_0^{2\pi \times n} \frac{\lambda(\varphi) \cdot (b / (2 \cdot \pi) \cdot (a \cdot \varphi \cdot \cos \varphi - r_0 \cdot \cos \varphi_0) - \varphi \cdot \sin \varphi \cdot (z - z_0))}{\left(a^2 \cdot \varphi^2 + r_0^2 - 2 \cdot a \cdot \varphi \cdot r_0 \cdot \cos(\varphi - \varphi_0) + (z - z_0)^2 \right)^{3/2}} d\varphi, \quad (8)$$

$$H_z(r_0, \varphi_0, z_0) = \frac{I}{4 \cdot \pi} \cdot \int_0^{2\pi \times n} \frac{\lambda(\varphi) \cdot (a \cdot \varphi^2 - r_0 \cdot \varphi \cdot \cos(\varphi - \varphi_0))}{\left(a^2 \cdot \varphi^2 + r_0^2 - 2 \cdot a \cdot \varphi \cdot r_0 \cdot \cos(\varphi - \varphi_0) + (z - z_0)^2 \right)^{3/2}} d\varphi, \quad (9)$$

$$H_r(r_0, z_0) = \frac{I \cdot R_y \cdot z_0}{4\pi} \times \int_0^{2\pi} \frac{1}{\left(R_y^2 + r_0^2 - 2R_y \cdot r_0 \cdot \cos(\varphi) + z_0^2 \right)^{3/2}} \cdot d\varphi. \quad (6)$$

Рассмотрим магнитное поле, возникающее вблизи проводника в форме пространственной спирали Архимеда, по которому протекает ток I (рис. 2, б). Форма такого проводника в параметрическом виде задается как $y(\varphi) = a \cdot \varphi \cdot \cos(\varphi)$, $x(\varphi) = a \cdot \varphi \cdot \sin(\varphi)$, $z(\varphi) = b \cdot \varphi / (2 \cdot \pi)$, где $a = R_y / (2\pi \cdot n)$ – параметр, определяющий радиальное смещение линии и характеризующий количество витков n , которые сделает спираль для достижения внешнего радиуса $r = R_y$. Полную длину пространственной спирали Архимеда можно определить как

$$L_a = \int_0^{2\pi n} \sqrt{a^2 (\varphi^2 + 1) + \frac{b^2}{4\pi^2}} d\varphi.$$

Распишем координаты векторов $\vec{R}$, $\vec{r}'$ (см. рис. 2, б):

$$\vec{R} = (a \cdot \varphi \cdot \cos \varphi, a \cdot \varphi \cdot \sin \varphi, z),$$

$$\vec{r}' = |\vec{AB}| = (a \cdot \varphi \cdot \cos \varphi - x_0, a \cdot \varphi \cdot \sin \varphi - y_0, z - z_0).$$

Аналогично, как и с винтовой линией, получаем длину вектора $|\vec{dl}| = \sqrt{dR_y^2 + dh^2 + dz^2}$, направление единичного вектора $\vec{l}_e$ и вектор $d\vec{l}$.

В точке, заданной цилиндрическими координатами $A(r_0, \varphi_0, z_0)$, вблизи проводника в виде пространственной спирали Архимеда, содержащей n витков, проекции напряженности магнитного поля имеют вид:

$$\text{где } \lambda(\varphi) = \sqrt{\frac{4 \cdot a^2 \cdot \pi^2 + 4 \cdot a^2 \cdot \pi^2 \cdot \varphi^2 + b^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot \varphi^2 + b^2}}.$$

В частном случае, при $b=0$ можно получить математическую модель магнитного поля вблизи плоской спирали Архимеда [4]:

$$H_x(r_0, \varphi_0, z_0) = \frac{I \cdot a \cdot z_0}{4\pi} \times \int_0^{2\pi n} \frac{\sqrt{1+\varphi^2} \cos f}{(a^2 \cdot \varphi^2 + r_0^2 - 2a \cdot \varphi \cdot r_0 \cdot \cos(\varphi - \varphi_0) + z_0^2)^{3/2}} \cdot d\varphi, \quad (10)$$

$$H_y(r_0, \varphi_0, z_0) = \frac{I \cdot a \cdot z_0}{4\pi} \times \int_0^{2\pi n} \frac{-\sqrt{1+\varphi^2} \sin f}{(a^2 \cdot \varphi^2 + r_0^2 - 2a \cdot \varphi \cdot r_0 \cdot \cos(\varphi - \varphi_0) + z_0^2)^{3/2}} \cdot d\varphi, \quad (11)$$

$$H_z(r_0, \varphi_0, z_0) = \frac{I \cdot a}{4\pi} \times \int_0^{2\pi n} \frac{\sqrt{1+\varphi^2} (a \cdot \varphi \cdot r_0 \cdot \cos(\varphi - \varphi_0))}{(a^2 \cdot \varphi^2 + r_0^2 - 2a \cdot \varphi \cdot r_0 \cdot \cos(\varphi - \varphi_0) + z_0^2)^{3/2}} \cdot d\varphi. \quad (12)$$

Посредством компьютерного моделирования проведено исследование поведения магнитного поля в ванне сталеплавильной печи ДППТ-5 стандартной конфигурации с одним подовым электродом при следующих параметрах: $I=6$ кА; радиус ванны по жидкому металлу $R_6=1,245$ м; высота ванны по жидкому металлу и шлаку $H_6=0,34$ м. Моделирование магнитного поля проводилось для токоподвода к подовому электроду, выполненного в виде винтовой линии $R_4=1,2$ м, $b=-0,3$ м, $n=4$ ($L_6 \approx 30,2$ м) и в виде пространственной спирали Архимеда $b=-0,3$ м, $n=4$, $a=0,048$ м ($L_6 \approx 15,3$ м).

При моделировании принималось, что ванна с расплавом находится в положительном полупространстве ($z>0$) относительно xOy , а шина токоподвода располагается в отрицательном полупространстве ($z<0$). Подина ванны, контактирующая с жидким металлом, расположена на расстоянии $z=0,3$ м. Построены графики изменения осевой и радиальной составляющих напряженности магнитного поля в разных областях ванны при разной форме токоподвода. При этом учитывалось влияние магнитного поля только от токоподвода.

На рис. 3 для токоподвода, выполненного в виде винтовой линии, показана зависимость осевой H_z и радиальной H_r проекций напряженности

магнитного поля по координате r на подине, на середине ванны по ее высоте и на ее свободной поверхности. Видно, что осевая и радиальная проекции напряженности магнитного поля имеют один порядок, при этом с приближением к краю витков ($r \rightarrow R_4$) величина H_z снижается, а H_r возрастает. С увеличением расстояния z от токоподвода значения напряженностей магнитного поля снижаются.

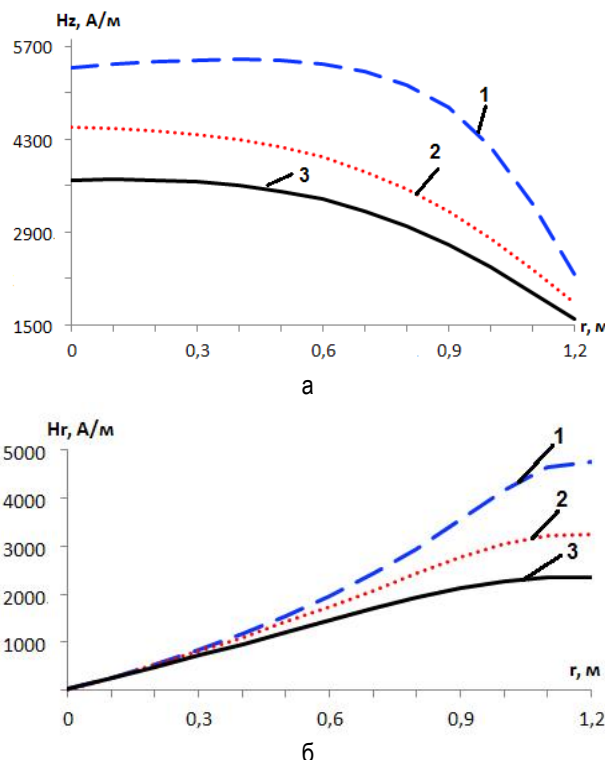


Рис. 3. Зависимости осевой (а) и радиальной (б) проекций напряженности магнитного поля по радиусу ванны для $\varphi=\pi/3$, создаваемых винтовой линией: 1 – на подине ванны ($z=0,3$ м); 2 – на середине ванны по ее высоте ($z=0,47$ м); 3 – на свободной поверхности ванны ($z=0,64$ м)

На рис. 4 показаны аналогичные зависимости осевой H_z и радиальной H_r проекции напряженности магнитного поля для токоподвода, выполненного в виде пространственной спирали Архимеда, по координате r . Видно, что величина осевой проекции напряженности магнитного поля H_z примерно на один порядок больше, чем радиальная H_r . С возрастанием расстояния z от токоподвода значение напряженности магнитного поля снижается для обеих проекций. Также из графиков видно (рис. 4, б), что радиальная составляющая магнитного поля для пространственной спирали Архимеда вдоль координаты r имеет экстремум.

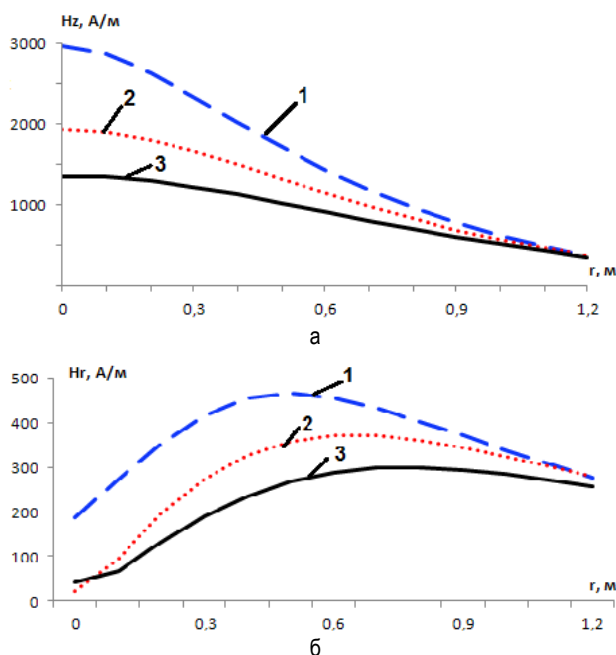


Рис. 4. Зависимости осевой (а) и радиальной (б) проекций напряженности магнитного поля по радиусу ванны, создаваемых пространственной спиралью Архимеда (при $\varphi=\pi/3$): 1 – на подине ванны ($z=0,3$ м); 2 – на середине ванны по ее высоте ($z=0,47$ м); 3 – на свободной поверхности ванны ($z=0,64$ м)

Для токоподвода в виде винтовой линии проекция напряженности магнитного поля H_z при движении по координате r сначала практически не меняется до $r/R_v < 0,5$, а затем наблюдается ее резкое снижение (рис. 3, а). Для токоподвода в виде пространственной спирали Архимеда для величины осевой напряженности магнитного поля это снижение имеет плавный характер (рис. 4, а). H_z в обоих случаях имеют один порядок. С увеличением значений координаты r для винтовой линии наблюдаем плавный рост величины H_r (рис. 3, б), а для пространственной спирали Архимеда – максимальное значение поля (см. рис. 4, б).

Для плоской спирали Архимеда расчеты проводились для следующих условий: $I=6$ кА, $R_v=1,2$ м, $a=0,048$ м, $n=4$, а расстояние от плоскости витка токоподвода до подины ванны, контактирующей с жидким металлом, составляет 0,3 м [4].

На рис. 5 показаны зависимости осевой и радиальной проекций напряженностей магнитного поля от координаты r , создаваемых токоподводом в виде плоской спирали Архимеда. Проекция H_z и H_r имеют величины одного порядка. При этом значение H_z имеет максимальные величины на оси. Для H_r , как и для пространственной спирали Архимеда, наблюдается максимальное значение поля при движении от оси ванны к периферии.

При сравнении пространственной и плоской

спиралей Архимеда можно сказать, что графики полученных кривых имеют похожий вид, но разные значения напряженностей. Для плоской спирали Архимеда величина осевой проекции напряженности магнитного поля в 1,3 раза больше на оси и практически нулевые значения при $r=1,2$ м (рис. 5, а). Величина радиальной проекции напряженности магнитного поля на порядок больше (рис. 5, б), по сравнению с H_r , создаваемой пространственной спиралью Архимеда (см. рис. 4, б).

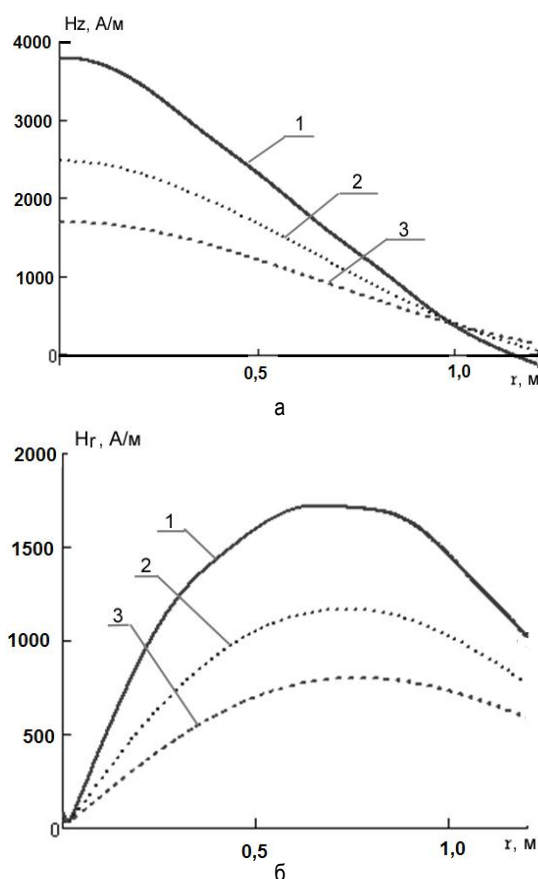


Рис. 5. Зависимости осевой (а) и радиальной (б) проекций напряженности магнитного поля от координаты r , создаваемых токоподводом в виде плоской спирали Архимеда (в): 1 – на подине ванны ($z=0,3$ м); 2 – на середине ванны по ее высоте ($z=0,47$ м); 3 – на свободной поверхности ванны ($z=0,64$ м)

Получена зависимость осевой проекции напряженности магнитного поля от числа витков для токоподводов разной конфигурации на середине ванны ($r=0$, $z=0,47$ м) (рис. 6). Видно, что для токоподвода в форме винтовой линии осевая проекция напряженности магнитного поля H_z плавно возрастает. Для токоподвода в форме пространственной спирали Архимеда H_z имеет максимальное значение при количестве витков $n=3-4$. При этом величина H_z в два раза меньше, чем для токоподвода в форме винтовой линии.

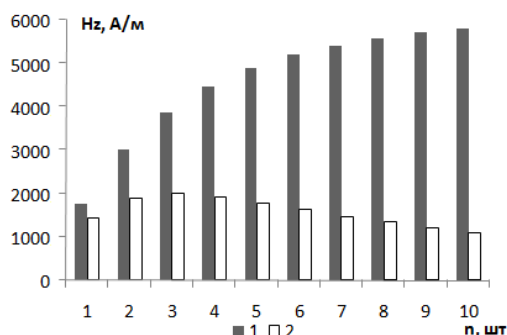


Рис. 6. Зависимость осевой напряженности магнитного поля от числа витков, при $r=0$, $z=0,47$ м для токоподводов разной формы: 1 – винтовая линия; 2 – пространственная спираль Архимеда

Выводы

Создана математическая модель поведения горизонтальной и вертикальной составляющих магнитного поля в ванне дуговой печи при разных конструкциях токоподвода к подовому электроду.

Посредством компьютерного моделирования установлено, что с увеличением количества витков токоподвода в виде пространственной спирали Архимеда наиболее рациональным является токоподвод из 2–3 витков. Для токоподвода в форме винтовой линии число витков должно быть не более 5–6, так как с их дальнейшим увеличением величина магнитного поля возрастает незначительно. Наиболее перспективной является конструкция токоподвода в форме плоской

спирали Архимеда, так как при прочих равных условиях при компактной форме она обеспечивает высокие значения напряженности магнитного поля в обрабатываемом расплаве.

Результаты данной работы могут быть полезны проектным организациям, занимающимся конструированием новых и модернизацией действующих дуговых печей постоянного тока по выплавке металлов и сплавов.

Список литературы

1. Ячиков И.М., Портнова И.В., Харченко О.А. Характер электровихревого течения металла в ванне ДППТ при изменении положения катода // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, 2009. № 3. С. 18–20.
2. Пат. 119556 на ПМ РФ, МКИ⁷ H05B 7/20. Электродуговая печь постоянного тока / Портнова И.В., Ячиков И.М., Харченко О.А.
3. Пат. 126810 на ПМ РФ, МКИ⁷ F27B3/08. Электродуговая печь постоянного тока / Ячиков И.М., Портнова И.В., Залаяудинов Р.Ю.
4. Ячиков И.М., Портнова И.В. Оценка эффективности электровихревого и кондукционного воздействия на расплав в ванне ДППТ // Теория и практика тепловых процессов в металлургии: сб. докл. междунар. науч.-практ. конф. Екатеринбург: УрФУ, 2012. С. 418–423.
5. Ячиков И.М., Залаяудинов Р.Ю. Исследование магнитного поля в ванне дуговой печи постоянного тока при разной форме токоподводящей шины к подовому электроду // Изв. вузов. Черная металлургия. 2014. № 3. С. 58–63.
6. Ячиков И.М., Портнова И.В., Залаяудинов Р.Ю. Моделирование поведения магнитного поля в ванне ДППТ при разных конструкциях токоподвода к подовому электроду // Математическое и программное обеспечение в промышленной и социальной сферах: междунар. сб. науч. тр. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. С. 183–190.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

BEHAVIOR OF A MAGNETIC FIELD IN A BATH OF A DC ARC FURNACE WITH DIFFERENT DESIGNS OF A SUPPLY RAIL TO A BOTTOM ELECTRODE

Yachikov Igor Mikhailovich – D.Sc. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. Phone: +7 (3519) 29-85-63. E-mail: yachikov@mail.ru.

Portnova Irina Vasilyevna – Engineer, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. Phone: +7 (3519) 29-85-63.

Abstract. This paper gives a mathematical model to determine the magnetic fields near conductors to the bottom electrode of a DC arc furnace (DCAF) in the form of a helical line, a planar or spatial spiral of Archimedes. A computer simulation is used to analyze magnetic fields in a DCAF bath. Recommendations for the design parameters of the supply rail are given.

Keywords: DC arc furnace, magnetic field, conductors.

References

1. Yachikov I.M., Portnova I.V., Kharchenko O.A. A character of an eddy flow of metal in a bath of a DC arc furnace, when changing a position of a cathode. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2009, no. 3, pp. 18–20.
2. Utility model patent RU 119556 IPC⁷ H05B 7/20. DC electrical arc furnace. Portnova I.V., Yachikov I.M., Kharchenko O.A.
3. Utility model patent RU 126810 IPC⁷ F27B3/08. DC electrical arc furnace. Yachikov I.M., Portnova I.V., Zalyautdinov R.Yu.
4. Yachikov I.M., Portnova I.V. Evaluating efficiency of an eddy and conduction impact on the melt in the DCAF bath. *Teoriya i praktika teplovykh protsessov v metallurgii: sbornik dokladov mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Theory and practice of thermal processes in metallurgy. Collection of reports of the international scientific and practical conference]. Yekaterinburg: UFU, 2012, pp. 418–423.
5. Yachikov I.M., Zalyautdinov R.Yu. Investigation of a magnetic field in a bath of a DC arc furnace at different busbars to the bottom electrode. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy]. 2014, no. 3, pp. 58–63.
6. Yachikov I.M., Portnova I.V., Zalyautdinov R.Yu. Modeling the behavior of a magnetic field in the bath of DCAF at different designs of current feeders to the bottom electrode. *Matematicheskoe i programnoe obespechenie v promyshlennoy i sotsial'noy sferakh: mezhdunarodnyy sbornik nauchnykh trudov* [Mathematical support and software in industrial and social spheres: international collection of research papers]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2012, pp. 183–190.

НАДЕЖНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

УДК 622.732

ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНЫХ ПОДХОДОВ К УПРАВЛЕНИЮ ДРОБИЛКАМИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ТИПА ПРОИЗВОДСТВА ЗАО «УРАЛ-ОМЕГА» С УЧЕТОМ КАЧЕСТВА ПОЛУЧАЕМОГО ПРОДУКТА

Бурнашев Р.Э., Рябчиков М.Ю., Гребенникова В.В., Рябчикова Е.С.

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

Аннотация. В работе рассмотрены перспективы дальнейшего совершенствования управления работой дробилок центробежного типа производства ЗАО «Урал-Омега» с целью обеспечения их максимальной производительности при поддержании требуемого качества получаемого продукта при заданных технологических ограничениях по нагрузке на двигатель. Предлагается использование двухконтурной системы управления процессом дозирования дробимых материалов с обеспечением рациональной скорости их разгона в камере измельчения. Задачей системы является возможность управления процессом дробления в условиях действующих возмущений по свойствам исходных материалов, таким как прочность и влажность, с оперативным контролем оценок качества получаемого продукта по доли и лещадности различных фракций.

Ключевые слова: управление качеством, центробежная дробилка, измельчение рудных и нерудных материалов, оптимизация управления дозированием.

Введение

Дробилки центробежно-ударного действия с вертикальным ротором на данный момент являются новейшими и наиболее перспективными дробильными машинами. Это связано с тем, что разрушение свободным ударом материала о материал или материала об отбойную плиту имеет ряд преимуществ в качественном отношении в сравнении с разрушением дробящим механизмом, например, отбойной плитой щековой дробилки [9].

Модификации центробежных дробилок разной производительности и предназначенные для работы с различными материалами могут применяться в таких отраслях, как обогащение руд, измельчение рудных и нерудных материалов, производство цементов и т.д. [10].

Принцип действия центробежной дробилки представлен на **рис. 1**. Исходный материал через загрузочную воронку подается в центр вращающегося ускорителя, который с большой скоростью разбрасывает материал в камере измельчения на отбойную поверхность, сформированную

исходным материалом. Далее материал дробится, свободно падает вниз и через выгрузные каналы подается для дальнейшего использования.

Основным элементом конструкции дробилки является ускоритель, разгоняющий материал до высокой скорости и выбрасывающий его в камеру измельчения. Вентилятор наддува подает воздух в камеру наддува и создает так называемую «воздушную подушку» между ротором и статором. При работе дробилки ротор выполняет несущую функцию рабочего органа и воспринимает ударные осевые и тангенциальные нагрузки от ускорителя. Статор представляет собой неподвижную сферообразную «чашу», выполняющую функцию воздушно-опорного узла [3].

Основным преимуществом центробежных дробилок по сравнению с любыми конусными дробилками является более качественный готовый продукт. Оценками качества выступает фракционный состав и лещадность или кубовидность продуктов дробления. ГОСТ 8267-82 «Щебень и гравий из плотных горных пород для

строительных работ» определяет кубовидный щебень как щебень, зерна которого имеют форму куба, при содержании зерен пластинчатой (лещадной) и игловатой формы до 15%.

На конусных дробилках наиболее качественной является фракция 10–20 мм. Во фракции 5–10 мм содержание лещадных зерен может достигать до 30%. Во фракции 0–5 мм лещадность практически всегда превосходит 50%. Такая высокая лещадность не позволяет использовать отсеивы дробления, как искусственный песок. То есть более 25–30% результатов дробления не может использоваться и выкидывается, занимая

отвалами большие земельные площади и снижая рентабельность производства [4].

Лещадность продуктов дробления, полученных на центробежных дробилках, не превышает 10%, и получаемый щебень относится к первой категории качества. Отсевы дробления (фракция 0–5 мм), как правило, получаются с лещадностью ниже 13–15%, что позволяет их использование в строительстве в качестве искусственного песка.

Особенностью центробежных дробилок является рост доли отсеивов 0–5 мм на 5–10%, количество которых увеличивается с ростом оборотов двигателя и скорости удара (рис. 2).

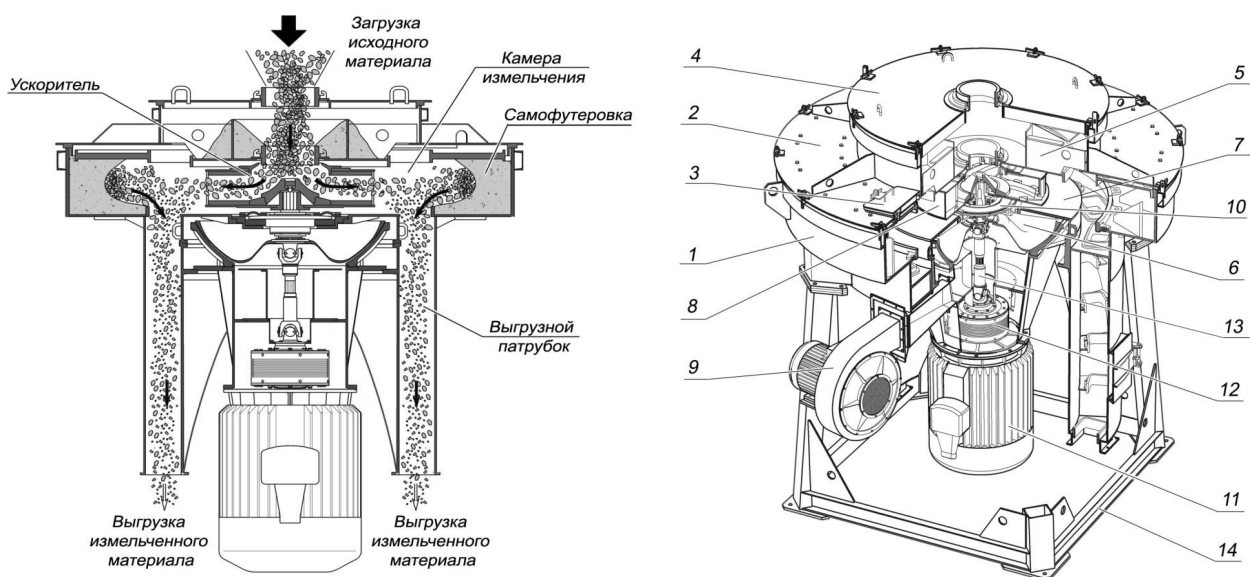


Рис. 1. Принцип действия и конструкция центробежной дробилки [1–3]:

- 1 – корпус с камерой измельчения и выгрузными патрубками; 2 – крышка корпуса; 3 – смотровой люк; 4 – крышка (с загрузочной воронкой); 5 – внутренняя вставка с воронкой; 6 – воздушно-опорный узел; 7 – крышка воздушно-опорного узла; 8 – ускоритель; 9 – вентилятор наддува; 10 – подшипниковая опора; 11 – электродвигатель привода дробилки; 12 – муфта; 13 – карданный вал; 14 – рама

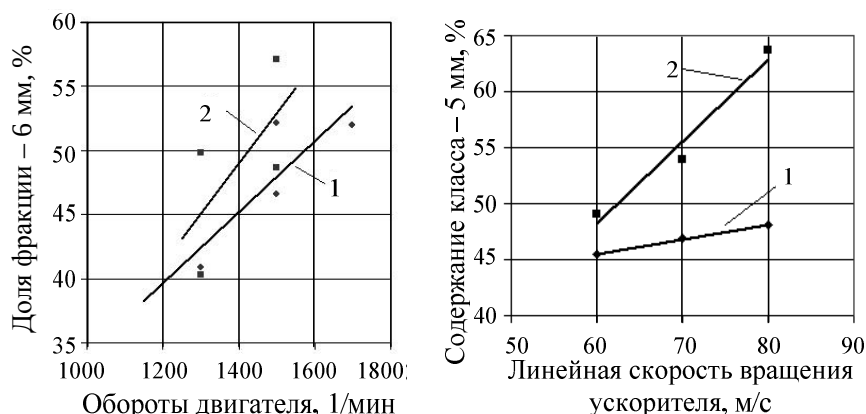


Рис. 2. Зависимости доли отсеивов центробежной дробилки ЗАО «Урал-Омега» производительностью 150 т/ч от: а – оборотов двигателя привода дробилки, полученная при дроблении гранита (1 – ускоритель Ø 1,1; 2 – ускоритель Ø 1,25); б – линейной скорости вращения ускорителя (1 – гранит ДС-0.4; 2 – гравий ДС-0.4)

Прочность и лещадность получаемого продукта также зависят от скорости удара. При этом упрочнение, за счет дробления по наиболее слабым местам, идёт до скорости удара 50–65 м/с, а при более высокой скорости, достигающей 100 м/с, происходит образование новых трещин, что позволяет эффективно использовать шаровые мельницы для дальнейшего измельчения. Лещадность с ростом скорости удара снижается.

Из рис. 2 видно, что доля отсева зависит от оборотов двигателя и соответственно скорости удара. Также виден значительный разброс доли мелочи при постоянных оборотах, что связано с непостоянством свойств дробимых материалов. Существенным возмущающим фактором, оказывающим влияние как на качество получаемого продукта, так и на производительность дробилки, является непостоянство влажности исходных материалов.

На лещадность продукта оказывает влияние множество факторов, таких, например, как дробимость исходного материала, крепость по методу Протодяконова [2], исходный фракционный состав и лещадность сырья, скорость удара и др. (см. таблицу).

Результаты лабораторных испытаний ЗАО «Урал-Омега» для ряда материалов

Материал	Дробимость	Лещадность исходная, %	Скорость удара, м/с	Лещадность продукта, %	Изменение лещадности, %
Порфирит	1000	34,5	70	5	29,5
Щебень	1100	48	70	23,5	24,5
Диабаз	1400	38	60	11	27

В связи с указанными особенностями, выбор скорости удара, как правило, производится путем постановки серии экспериментов индивидуально для каждого нового исходного сырья. Из результатов проведенных в ЗАО «Урал-Омега» экспериментов (рис. 3) видно, что зависимости лещадности от скорости близки к линейным, за исключением диапазона низких уровней порядка 1–2%.

Несмотря на значительный объем накопленной экспериментальной информации, в настоящее время не удается получить общие статистические зависимости, которые могли бы использоваться в задачах оптимизации управления процессом дробления с учетом качества получаемой продукции.

Для автоматизации процесса дробления в подобных условиях необходима разработка новых и использование существующих методов оператив-

ного контроля качества материалов. При этом, если оперативный контроль доли отсевов, количество которых часто оговорено заказчиком, не представляет принципиальной сложности, то измерение лещадности является сложной задачей.

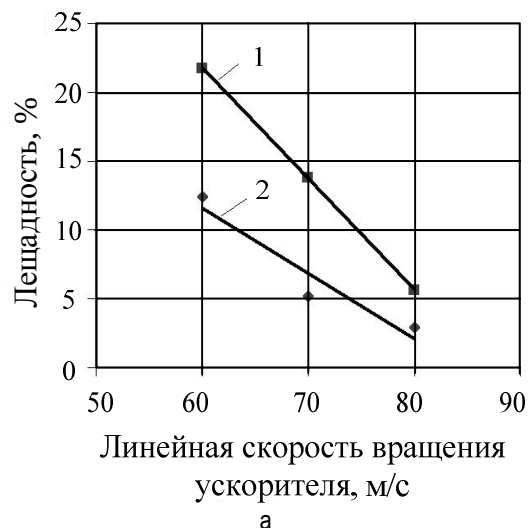


Рис. 3. Зависимость содержания лещадных зерен от линейной скорости вращения ускорителя для различных фракций и материалов:
а – гранит ДС-0.4 (1 – 10–20 мм; 2 – 5–10 мм);
б – гравий ДС-0.4 (1 – 10–15 мм; 2 – 5–10 мм)

Система автоматического управления процессом дробления

Важнейшим элементом автоматического управления качеством процесса дробления является автоматический контроль лещадности. Системы подобного типа существуют. Например, патент [5] предлагает автоматический измеритель лещадности щебня, отличающийся тем, что

он состоит из ленты, скользящей по металлической пластине, приводящейся в движение электроприводом, по которой движутся зерна щебня, попадающие в зону срабатывания инфракрасного датчика, ламп подсветки и видеокамер (рис. 4).

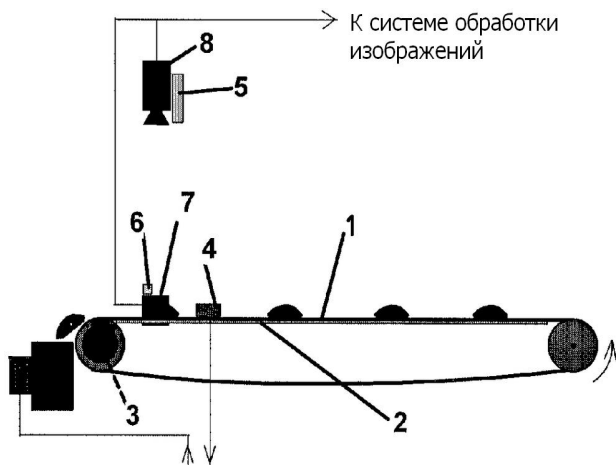


Рис. 4. Предлагаемый патентом [5] вариант организации контроля лещадности щебня:

- 1 – лента; 2 – металлическая пластина;
3 – электропривод; 4 – инфракрасный датчик;
5, 6 – лампы подсветки; 7, 8 – видеокамеры

Инфракрасный датчик посылает сигнал через плату оптической развязки, который, обрабатывая изображения с видеокамер, подключенных к плате видеозахвата, вычисляет линейные размеры зерна и решает, принадлежит зерно к лещадным или нет [5].

Контроль лещадности необходимо либо проводить отдельно для фракций различного размера 5–10 и 10–20 мм, либо, учитывая высокую стабильность лещадности для фракций различного размера, характерную для центробежных дробилок, возможен контроль в едином потоке. Общая структура процесса дробления с контролем лещадности и доли фракции –5 мм представлена на рис. 5.

Исходный материал в дробильно-сортировочную линию подается ленточным питателем №1 из бункера исходного материала. В соответствии с требованиями к питанию центробежной дробилки крупность исходного материала не должна превышать 70 мм. С ленточного питателя №1 исходный материал попадает на ленточный конвейер №1, который транспортирует сырье на грохот №1. На грохоте №1 отсеивается фракция 0–5 мм и транспортируется ленточным конвейером №2 в отвалы. Фракция

+5 мм с грохота №1 ленточным конвейером №3 транспортируются в промежуточный бункер. Промежуточный бункер используется для обеспечения стабильности питания центробежной дробилки. Загрузка в дробилку осуществляется ленточным питателем №2. Управление расходом исходного материала осуществляется изменением скорости движения ленты ленточного питателя №2.

Продукт центробежного дробления ленточным конвейером №4 транспортируется на грохот №2. На грохоте №2 дробленый материал разделяется на фракции 0–5, 5–10, 10–20 и 20–40 мм, которые транспортируются в соответствующие отвалы (или бункеры) конвейерами №8, 7, 6 и 5 соответственно.

На ленточном конвейере №5 установлена весоизмерительная система для определения количества отсева (продукта дробления фракции 0–5 мм). Также весоизмерительную систему целесообразно установить на ленточном конвейере №8 (если цикл замкнутый и фракция 20–40 мм является возвратом).

Для решения задач оптимизации управления предлагается система на основе двух контуров управления. Задачей быстродействующего контура является управление производительностью с использованием ленточного питателя №2 с целью ее вывода на максимально допустимый уровень, исходя из тока и мощности, потребляемой электродвигателем при обеспечении заданного числа оборотов. На рис. 6 показаны экспериментальные данные по зависимости нагрузки привода от расхода дробимых материалов при различных поддерживаемых оборотах двигателя.

На качество управления производительностью дробилки оказывают значимое влияние два основных типа возмущающих воздействий, связанных с особенностями дозирования материалов и постепенным изменением их свойств. Результаты оценки спектральных особенностей действия возмущений по току (рис. 7) позволяют предположить, что при периодах 20–40 с значительно влияние дозирования, а при периодах более 60–80 с сказывается непостоянство свойств дробимых материалов. Для проверки работоспособности предлагаемых алгоритмов управления использовали авторегрессионную (AR, $p=10$) модель возмущений по току при моделировании переходных процессов в контуре.

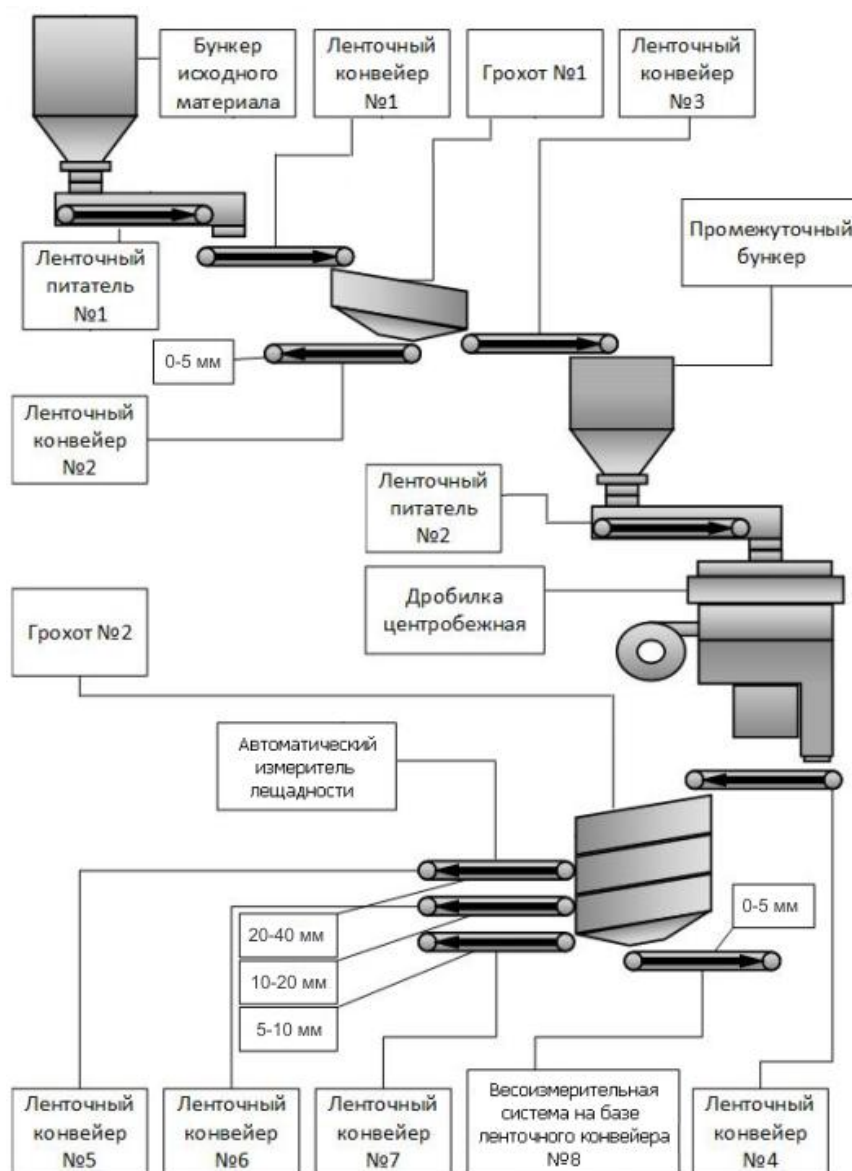


Рис. 5. Структура процесса дробления с контролем лещадности и доли фракции –5 мм

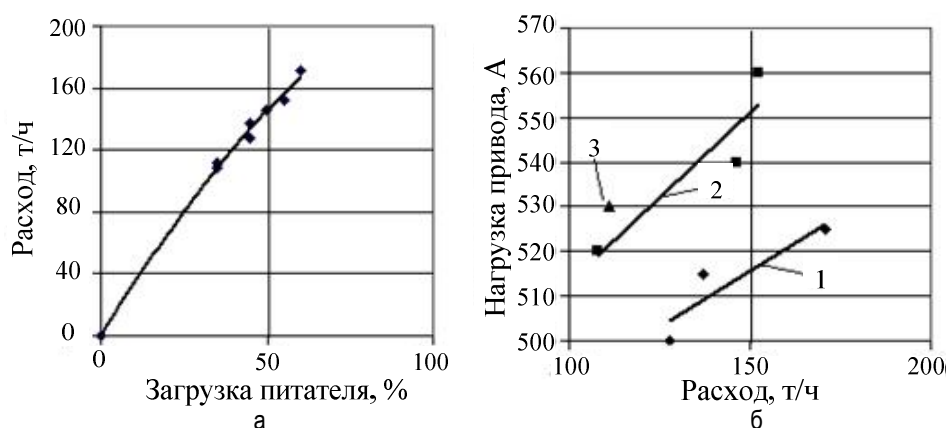


Рис. 6. Экспериментальные данные по зависимости нагрузки привода от расхода дробимых материалов при различных поддерживаемых оборотах двигателя:

а – статическая характеристика питателя; б – влияние расхода при разных оборотах двигателя на нагрузку привода; 1 – 1200 об/мин; 2 – 1500 об/мин; 3 – 1700 об/мин

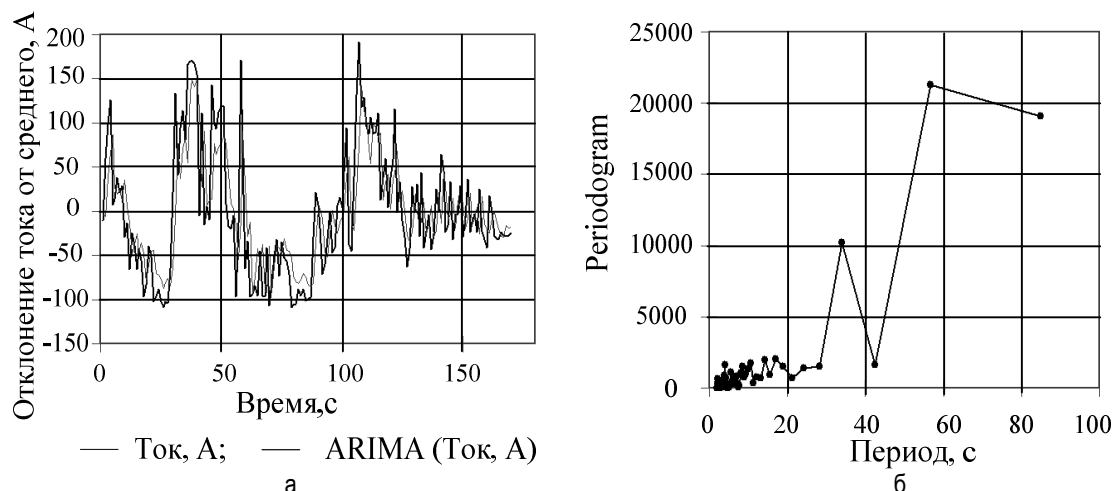


Рис. 7. Пример отклонений тока от среднего уровня при дроблении гранита с постоянным расходом (а) и полученные спектральные оценки возмущений (б)

Экспериментальные данные позволили получить приближенную линейную модель влияния уровня поддерживаемых оборотов асинхронного двигателя n (об/мин) и расхода гранита V (т/ч) на момент нагрузки на валу двигателя:

$$M = 976 + 11,84 \cdot n - 0,85 \cdot V - 0,00141529 \times \\ \times n \cdot V - 0,028 \cdot n^2 + 0,00033 \cdot V^2 \quad (\text{Н} / \text{м}),$$

что совместно с моделью возмущений позволяет проводить проверку работоспособности системы управления расходом в условиях, приближенных к реальным.

Задачей второго контура является изменение задания по числу оборотов в разрешенных пределах с целью оптимизации оперативно контролируемого качества получаемой продукции, которое оценивается по лещадности различных фракций и доли мелочи – 5 мм.

Для решения задачи управления качеством предлагается использовать метод Герды Айрон [6], который предполагает управление оборотами двигателя путем одновременного взвешенного учета сигналов рассогласования по нескольким указанным информационным показателям. Алгоритм управления можно представить следующими уравнениями:

$$\Delta X_i^{\phi, \text{ном}} = X_i^{\phi} - X_i^{\phi, \text{зад}},$$

$$\Delta X_i^{\phi, \text{рас}} = \Delta X_i^{\phi, \text{ном}} - X_i^{\phi, \text{пр}},$$

$$k_i = \frac{G_{\Delta L}^2}{G_{\Delta X_i^{\phi, \text{ном}}}^2 + G_{\Delta L}^2 + N},$$

$$U = \sum_{i=1}^3 k_i \Delta X_i^{\phi, \text{рас}},$$

(1)

где $\Delta X_i^{\phi, \text{ном}}$ – отклонение между измеренным значением показателя и директивно заданным; $\Delta X_i^{\phi, \text{рас}}$ – рассогласование между измеренным отклонением и спрогнозированным; k_i – весовые коэффициенты сигналов рассогласования; $G_{\Delta L}^2$ – дисперсия сигнала, пропорционального входному воздействию на регулятор управления оборотами двигателя; $G_{\Delta X_i^{\phi, \text{ном}}}^2$ – дисперсия сигнала, пропорционального измеренному отклонению показателя от заданного значения; U – воздействие в систему управления оборотами двигателя.

Управляющее воздействие, полученное по формуле (1), может использоваться как для прямой корректировки задания на обороты двигателя, так и может являться входным параметром типового ПИД-регулятора. Задачей подобной системы является определение рационального компромисса при поддержании на заданных уровнях значений контролируемых показателей качества путем контроля связи между дисперсиями рассогласований и управляющего параметра.

На рис. 8–9 представлены результаты моделирования переходных процессов в двухконтурной системе оптимизации управления работой центробежной дробилкой. Видно, что система поддерживает ток на заданном уровне 490 А, а также обеспечивает компромиссное решение при одновременной стабилизации лещадности фракций 5–10, 10–20 мм и доли фракции – 5 мм.

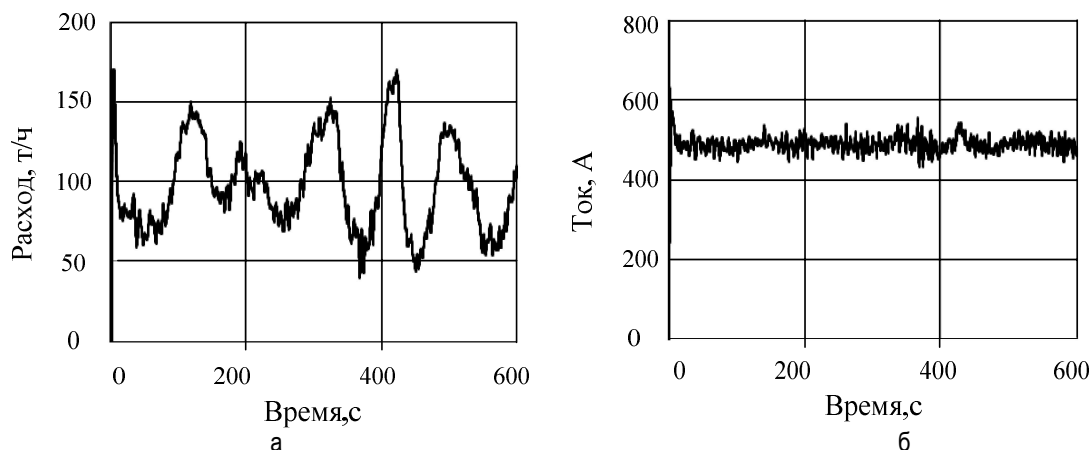


Рис. 8. Переходный процесс в контуре управления производительностью при моделировании совместной работы двухконтурной системы

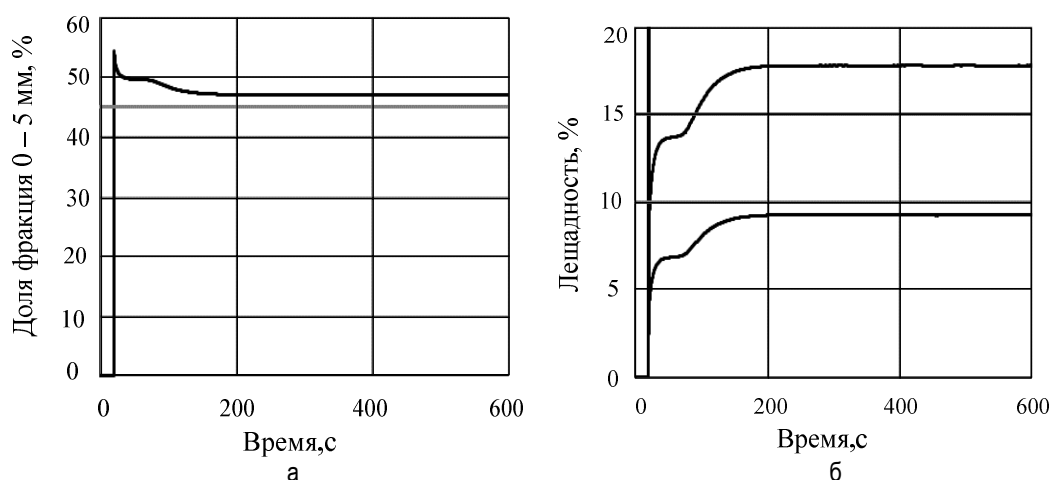


Рис. 9. Переходные процессы: по доле фракций – 5 мм (а: 1 – фактическое; 2 – заданное значение) и по лещадности (б: 1 – фактическая фракции 10–20; 2 – заданная для фракции 10–20; 3 – фактическая фракции 5–10; 4 – заданная фракции 5–10)

Заключение

В течение последнего десятилетия дробилки центробежного типа оказываются все более востребованными в различных отраслях промышленности, требуя разработки и использования современных интеллектуальных систем управления, функционирующих с учетом качества получаемой продукции. Однако до настоящего времени подходы к управлению ими изучены недостаточно. Практический опыт разработки и использования систем управления такими дробилками в ЗАО «Урал-Омега» показал, что основные сложности управления ими связаны с непостоянством свойств дробимых материалов, приводящим к существенным колебаниям нагрузки на двигатель в широком диапазоне частот, а также к изменению лещадности продукции и доли мелких фракций, количество которых часто оговаривается заказчиком.

Проводимые в настоящий момент исследова-

ния на базе лаборатории испытаний материалов в ЗАО «Урал-Омега» направлены на поиск новых способов оперативной оценки качества продукции, что позволяет значимо повысить технико-экономические показатели работы предприятия за счет комплексной оптимизации управления производительностью [7, 8] и качеством.

Список литературы

1. Бурнашев Р.Э. Управление устройством плавного пуска вентилятора центробежной дробилки по протоколу Modbus в условиях ЗАО «Урал-Омега» // Автоматизированные технологии и производства. 2013. № 5. С. 291-295.
2. Бурнашев Р.Э., Рябчиков М.Ю., Гребенникова В.В. Управление работой центробежной дробилки СС-0.36 с учетом значения коэффициента крепости исходного материала по методу Протодьяконова // Автоматизированные технологии и производства. 2014. № 6. С. 203-208.
3. Дробилка центробежная. Руководство по эксплуатации / НПО «Минск». 2013. 51 с.
4. Конкурентные преимущества дробилок Титан при производстве щебня. Режим доступа: www.ntds.ru.

5. Пат. 68523 РФ, МПК E01C. Автоматический измеритель лещадности щебня / Аникин П.М. Опубл. 27.11.2007.
6. Системные факторы оценки работоспособности электротехнических комплексов на основе интегrostохастических критериев энергоэффективности / И.Д. Труфанов, А.П. Лютый и др. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. (48) 2010. С. 46–58.
7. Нечеткое экстремальное управление процессом измельчения руды для обеспечения максимальной производительности / Рябчиков М.Ю., Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Полько П.Г., Логунова О.С., Рябчикова Е.С., Головкин Н.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. №4. С. 65–69.
8. Достижение максимальной производительности оптимизируемого процесса измельчения руды при использовании принципов нечеткого экстремального управления / Рябчиков М.Ю., Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Логунова О.С., Рябчикова Е.С., Головкин Н.А., Полько П.Г. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. №2. С. 5–9.
9. Хопунов Э.А. Селективное разрушение как частный случай дезинтеграции руд // Обогащение руд. 2010. №6. С. 27–33.
10. Бороха Э.Л., Воробьев В.В., Горобец А.В. Центробежные дробилки и мельницы ударного типа // Центробежная техника – высокие технологии. 2008. С. 5–16.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

THE STUDY OF PROBABLE APPROACHES TO CONTROLLING THE CENTRIFUGAL-TYPE CRUSHERS MANUFACTURED BY URAL-OMEGA CJSC FACTORING IN THE PRODUCT QUALITY

Burnashev Ruslan Erikovich – Postgraduate Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. E-mail: bre@uralomega.ru.

Ryabchikov Mikhail Yurievich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. Phone: +7 (3519) 298 558. E-mail: mr_mgn@mail.ru

Grebennikova Vera Vladimirovna – Assistant Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. Phone: +7 (3519) 298 558. E-mail: greb1981@mail.ru

Ryabchikova Elena Sergeevna – Assistant Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. Phone: +7 (3519) 298 558. E-mail: mika.elena@mail.ru

Abstract. The paper analyses the prospects for the further operation control improvement in the centrifugal-type crushers manufactured by Ural-Omega CJSC in order to maximize their performance in maintaining the required quality of the product obtained at given engineering limitations of motor load. The use of a double-circuit dispensing control system for crushable materials to ensure their reasonable dispersal speed in the grinding chamber is suggested. The task of the system is the ability to control a crushing process under acting disturbances in the properties of raw materials, such as strength and moisture content, with operational control of product grade estimation on the proportion and flakiness of the various fractions.

Keywords: quality control, centrifugal crusher, grinding of metallic and non-metallic materials, dispensing control optimization.

References

1. Burnashev R.E. Upravlenie ustroystvom plavnogo puska ventilyatora tsentrobezhnoy drobilki po protokolu Modbus v usloviyakh ZAO "Ural-Omega" [The control of a centrifugal crusher fan soft starter in accordance with the Modbus protocol at Ural-Omega CJSC]. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva* [Automated technologies and production]. 2013, no. 5, pp. 291-295.
2. Burnashev R.E., Ryabchikov M.Yu., Grebennikova V.V. Upravlenie rabotoy tsentrobezhnoy drobilki SS-0.36 s uchetom znacheniya koeffitsienta kreposti iskhodnogo materiala po metodu Protodyakonova [The CC 0.36 centrifugal crusher operation control taking into account the Protodyakonov hardness coefficient for raw material]. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva* [Automated technologies and production]. 2014, no. 6, pp. 203-208.
3. *Droblilka tsentrobezhnaya. Rukovodstvo po ekspluatatsii* [Centrifugal crusher. Operations Manual], SPA Minsk, 2013, 51 p.
4. *Konkurentnye preimushchestva drobilok Titan pri proizvodstve shchebnya. Rezhim dostupa* [The competitive advantages of Titan crushers in crushed stone production]. URL: <http://www.ntds.ru>.
5. Anikin P.M. *Avtomaticheskii izmeritel leshchadnosti shchebnya* [Automatic gauge for crushed rock flakiness]. Patent RF, no. 68523, 2007.
6. Trufanov I.D., Lyutyi A.P. et al. Sistemnye faktory otsenki rabotosposobnosti elektrotekhnicheskikh kompleksov na osnove integrostokhasticheskikh kriteriev energoeffektivnosti [System factors for electrical systems performance assessment on the basis of energy efficiency integral stochastic criteria]. *Vostochno-Evropeiskiy zhurnal peredovykh tekhnologii* [Eastern - European Journal of Advanced Technologies], (48) 2010, pp. 46-58.
7. Ryabchikov M.Yu., Parsunkin B.N., Andreev S.M., Polko P.G., Logunova O.S., Ryabchikova E.S., Golovko N.A. Nечеткое экстремальное управление процессом измельчения руды для обеспечения максимальной производительности [Fuzzy extremal ore grinding process control in order to ensure maximum performance]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2011, no. 4, pp. 65-69.
8. Ryabchikov M.Yu., Parsunkin B.N., Andreev S.M., Logunova O.S., Ryabchikova E.S., Golovko N.A., Polko P.G. Dostizhenie maksimalnoy proizvoditelnosti optimiziruемого процесса измельчения руды при использовании принципов нечеткого экстремального управления [The achievement of maximum performance for the optimized ore grinding process in utilizing the fuzzy extremal control principles]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2011, no. 2, pp. 5-9.
9. Khopunov E.A. Selektivnoe razrushenie kak chastnyi sluchay dezinintegratsii rud [Selective destruction as a special case of ore disintegration]. *Obogashchenie rud* [Ore Dressing], 2010, no. 6, pp. 27-33.
10. Borokha E.L., Vorobyev V.V., Gorobets A.V. Tsentrobezhnye drobilki i melnitsy udarnogo tipa [Centrifugal crushers and impact grinding mills]. *Tsentrobezhnaya tekhnika – vysokie tekhnologii* [Centrifugal equipment - high technologies], 2008, pp. 5-16.

ЭНЕРГЕТИКА МЕТАЛЛУРГИИ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ

УДК 620.98: 669.1

ТЕХНИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВНЕДРЕНИЯ АВТОНОМНОГО ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА В ОАО «УРАЛЬСКАЯ СТАЛЬ»

Бушуев А.Н.¹, Картавец С.В.², Кулагин А.Ю.³¹ Оренбургский государственный университет, Россия² Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Россия³ ОАО «Орскнефтеоргсинтез», г. Орск, Россия

Аннотация. Произведен подбор основного оборудования автономной системы электросталеплавильного производства комбината на базе парогазового цикла с предварительным подогревом металлошихты выхлопными газами газовой турбины. Согласно усредненной схеме параллельной работы двух дуговых печей комбината проанализирован режим работы котла-утилизатора при переменной температуре и переменном составе утилизируемых газов, поступающих в котел после камеры нагрева с холодной металлошихтой. На основании анализа работы котла-утилизатора определен полный КПД автономной системы энергообеспечения.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, котел-утилизатор, парогазовая установка, схема электрообеспечения, электросталеплавильное производство.

Введение

Орско-Халиловский металлургический комбинат (сегодня ОАО «Уральская Сталь») основан в 1955 году в г. Новотроицк (Оренбургская обл.) на базе уникального месторождения природно-легируемой железной руды и промышленных запасов известняка, никеля и огнеупорной глины.

Электросталеплавильное производство предприятия ОАО «Уральская Сталь» базировано на двух печах ДСП – 120. Предварительный подогрев металлошихты перед загрузкой в печь отсутствует.

При работе двух дуговых печей на предприятии каждая работает со смещением графика во времени относительно другой печи с целью минимизации промежутков времени параллельной работы.

Для упрощения дальнейших расчетов, анализируя паспорта плавок стали различных марок обеих печей, процесс выплавки может быть теоретически усреднен следующей временной схемой:

- 1) подготовка и завалка печи – 20 мин;
- 2) расплавление завалки – 5 мин;
- 3) подвалка (или заливка чугуна) – 5 мин;
- 4) расплавление и доводка – 35 мин.

Технические и технологические разработки

Отдельному рассмотрению предложена [1, 2] автономная система энергообеспечения (рис. 1), представляющая собой энергетический источник на базе парогазового цикла, обеспечивающий электросталеплавильное производство совместно электрической и тепловой энергией, вносимой в технологический процесс выплавки стали за счет предварительного подогрева лома перед плавкой. Система подразумевает подачу части ϕ выхлопных газов ГТУ в систему подогрева шихты (СПШ), представляющую собой бадью или шахту с засыпанным металлоломом, остаток $(1-\phi)$ подается непосредственно в котел-утилизатор (КУ). Охлажденный рабочий газ после СПШ также поступает в КУ, где обеспечивается дополнительное дожигание топлива в требуемом количестве B_2 для поддержания высокой температуры (более 1250°C) в целях деструкции диоксинов, образующихся при подогреве лома [2, 3].

При предлагаемой усредненной схеме работы печей, близкой к множеству реальных процессов плавления в ЭСПЦ ОАО «Уральская сталь» возможно осуществление параллельной работы автономной системы энергообеспечения с внешней сетью. При таком варианте энергообеспечения ЭСПЦ в моменты работы одной

печи полное энергообеспечение технологического процесса выплавки стали будет осуществляться от автономной системы, при одновременном включении обеих печей в сеть оптимально погашение половины электрической нагрузки от внешней сети. Усредненный график работы печей для данного случая приведен на рис. 2.

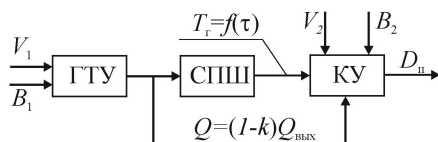


Рис. 1. Принципиальная схема работы системы подогрева металлического лома выхлопными газами ГТУ с последующей утилизацией в котле с дожиганием: B_1 , V_1 , B_2 , V_2 – подача топлива и требуемого количества воздуха в камеру сгорания ГТУ и в котел-утилизатор соответственно; Q – тепло, вносимое в котел выхлопными газами ГТУ; $Q_{\text{вых}}$ – теплосодержание выхлопных газов ГТУ; φ – доля отбора выхлопных газов на подогрев лома; D_n – паропроизводительность (теплопроизводительность) котла; T – температура рабочего газа за слоем металлолома как функция от времени

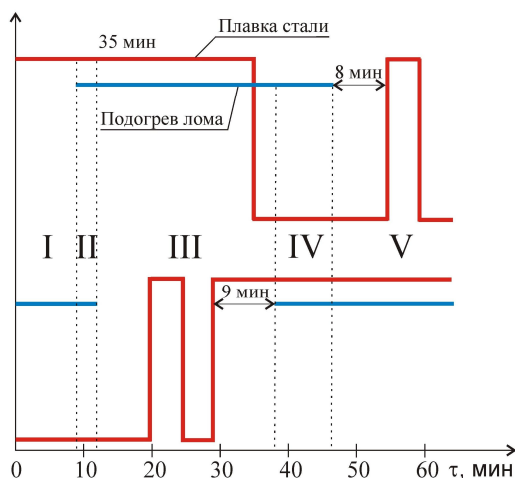


Рис. 2. Усредненный график работы двух ДСП с предварительным подогревом металлошихты

Во временной период I продолжительностью 9 мин производится подготовка печи №1 к загрузке, электрическая нагрузка отсутствует, также идет завершающий этап подогрева металлошихты. Нагрев был начат в предыдущем цикле совместной работы печей. В печи №2 начат период плавления дозагрузки и доводка печи. Загрузочная корзина печи №2 произвела дозагрузку в печь. Отбор выхлопных газов ГТУ отсутствует.

В период II (3 мин) электрическая нагрузка на сеть не изменяется. В загрузочной корзине

печи №1 идет завершающий этап подогрева металлошихты. В загрузочной корзине печи №2 начинается предварительный подогрев металлошихты подключением к ГТУ загрузочной корзины, что приводит к двукратному увеличению тепловой нагрузки и отбора газов турбины.

В течение периода III (27 мин) производится подключение печи №1 к сети (на 20-й минуте), плавление в течение 5 мин, остановка, дозагрузка и начало основного периода плавления. К концу периода завершается выплавка стали в печи №2 и осуществляется выпуск стали. Производится отключение загрузочной корзины печи №1 и ее транспортировка к печи. В корзине печи №2 подогрев металлошихты продолжается.

В период IV (8 мин) продолжается выплавка стали в печи №1, ведется подготовка печи №2. Начинается подогрев металлошихты в первой загрузочной корзине. Подключение приводит к двукратному возрастанию отбора выхлопных газов ГТУ. В корзине печи №2 ведется завершающий этап подогрева металлошихты.

В период V (18 мин) ведется завершающий этап выплавки стали в печи №1 и продолжается подогрев металлошихты. В данный период оканчивается подготовка печи №2, проводится загрузка, первоначальное расплавление и дозагрузка печи, начинается основное плавление стали. Выплавка будет окончена в следующем цикле. Подогрев металлошихты для печи окончен. Общая тепловая нагрузка понижается в 2 раза.

На 66-й минуте графика работы печей начинается следующий цикл, в точности повторяющий предыдущий. Предлагаемая упрощенная схема работы печей допускает всего 15 мин одновременной работы печей за цикл (примерно 23% от общего времени цикла) и 11 мин совместной работы двух загрузочных корзин.

Как показывает усреднение данных по месячным расходам электроэнергии ЭСПЦ за 2013 год, средняя мощность обеих печей лежит в пределах 24–26 МВт, т.е. печь находится под током в среднем 50% времени выплавки стали. Две печи предприятия составляют порядка 80% суммарной нагрузки ЭСПЦ. По среднемесячным данным электрических нагрузок цеха, суммарные нагрузки за исключением печей составляют порядка 14,5 МВт.

При оценке эффективности автономной системы энергообеспечения принимается вариант работы системы на электроснабжение всего цеха и одной дуговой печи, включая покрытие тепловой нагрузки нагрева лома обеих печей в электроплавильном цеху. Полная требуемая электрическая мощность в данном случае, с учетом повышающе-

го коэффициента запаса 1,25, составит 101,4 МВА.

Оптимальная доля электрической мощности ГТУ в системе лежит в пределах $\Theta = 0,34 - 0,38$ [1]. Допуская коэффициент $\Theta = 0,34$, принимается к установке основное оборудование автономной системы: газовая турбина Siemens SGT-700 номинальной мощностью 32,2 МВт в паре с электрогенератором ТТК-32-К-2УЗ-Г, паровая турбина Siemens SST-300 в паре с электрогенератором ТТК-50-К-2УЗ-П и котел-утилизатор с дожиганием топлива паропроизводительностью 220 т/ч.

Существующая схема электроснабжения ЭСПЦ не исключает возможности переподключения оборудования к автономной системе энергообеспечения при одновременном сохранении подстраховки от внешней сети.

Упрощенная схема электроснабжения ЭСПЦ с подключенной автономной системой изображена на **рис. 3**. Подключение каждой ДСП к автономной системе и к внешней сети может осуществляться вакуумным выключателем ВБЦ-35-20/1600УЗ, позволяющим производить переключения согласно программированному графику. Трансформаторы собственных нужд цеха будут подключены непосредственно к автономной си-

стеме. Отключение автономной системы от промежуточной шины может осуществляться разъемом РР3-35/2000УЗ, что позволит периодически подключать каждую ДСП к системе и к внешней сети согласно запрограммированному графику работы системы энергообеспечения.

По условиям работы рассматриваемой системы энергообеспечения в котле-утилизаторе должна осуществляться деактивация токсичных продуктов, образующихся при нагреве металлошихты, для чего требуется температура не менее 1250°C в течение 2 с. Расчёты показывают, что помимо газов ГТУ для выработки необходимого количества пара в КУ достаточно подавать только природный газ, воздух не требуется по причине избыточного количества кислорода в отходящих газах ГТУ (коэффициент избытка кислорода в топке котла лежит в пределах 1,02–1,19). При таких коэффициентах избытка кислорода в сочетании с относительно низкими концентрациями кислорода в газах ГТУ и отсутствии необходимости в подаче воздуха в топку КУ использование типовых котельных установок высокого давления, применяемых на теплоэлектростанциях, невозможно.

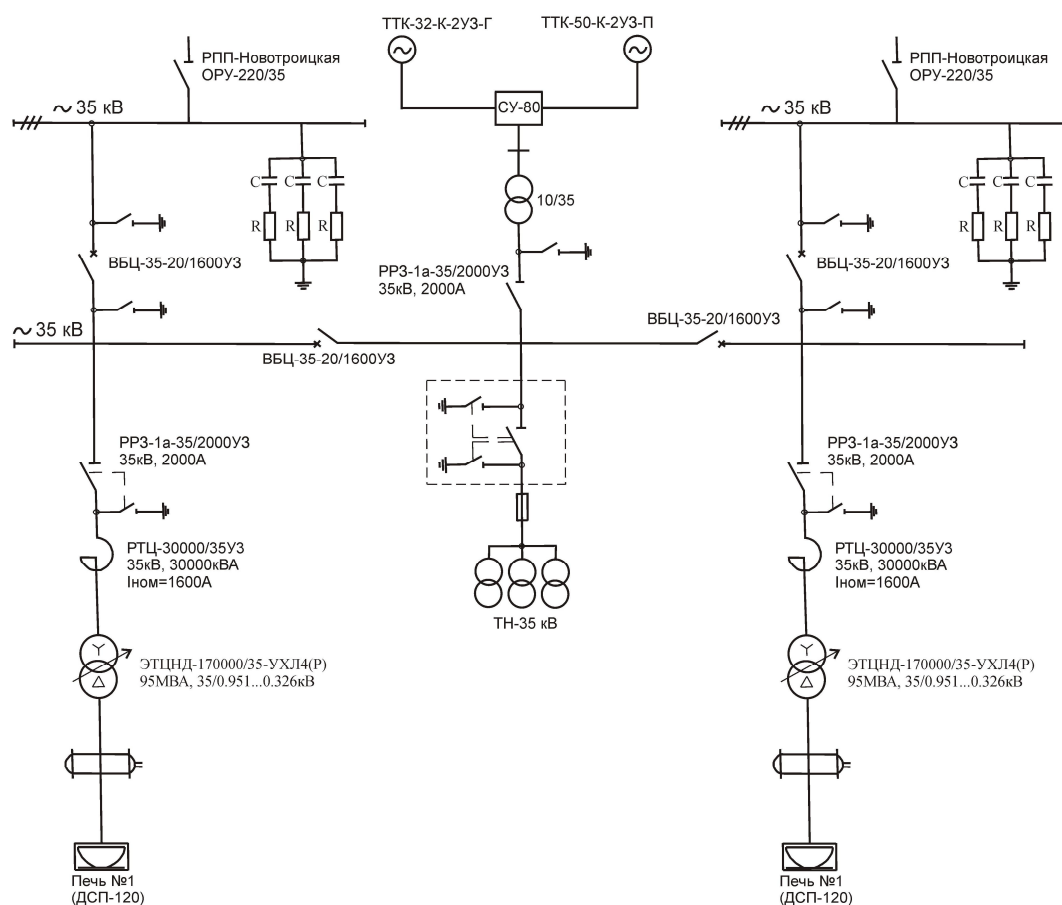


Рис. 3. Упрощенная схема электроснабжения ЭСПЦ с автономной системой:
СУ-80 – синхронизирующее устройство на 2 электрогенератора мощностью 80 МВт

Анализ работы парового котла в переменном режиме необходим для уточнения основных показателей автономной системы энергообеспечения в реальных условиях производства ОАО «Уральская сталь». Рассмотрению подлежит вариант работы системы с обеспечением подогрева металлошхты в двух загрузочных корзинах для обеих ДСП согласно графику (см. рис. 2).

Массовый расход газов на выходе турбины в нормальном режиме составляет 93,5–95 кг/с, задаваемый удельный массовый расход греющих газов для металлошхты – 0,35 кг/с [1] на 1 т, масса засыпки в корзине – 90 т.

При вышеуказанных условиях адиабатическая температура горения составляет 1468–1528°C, что допускает возможность не экранировать топочную камеру в целях выдержки дожигаемых газов при температуре выше 1250°C дольше 2 с. Кроме того, применение питательной воды с температурой 230°C делает невозможным охлаждение уходящих газов до экономичных значений температур. Следовательно, деаэрацию питательной воды необходимо производить в атмосферном деаэраторе с целью снижения температуры питательной воды до 104°C.

Компоновка поверхностей нагрева может быть различной. Для изучения зависимостей изменения теплового режима котла авторами выполнен тепловой конструктивный расчёт котла П-образной компоновки и поминутный расчёт основных параметров. Расположение поверхностей нагрева в газоходах котла принято следующее: на выходе из топки расположен пароперегреватель, за ним следует испаритель с принудительной циркуляцией и на выходе – водяной экономайзер.

При движении продуктов сгорания по газовому тракту соотношение лучистого и конвективного теплообмена в передаче тепла непрерывно снижается. Доля лучистого теплообмена составляет 21,9–22,9% в пароперегревателе и 2,9–3,5% в водяном экономайзере. Как видно из рис. 4, направления изменений тепловосприятия в поверхностях нагрева с существенным (пароперегреватель) и несущественным (водяной экономайзер) влиянием лучистого теплообмена противоположны. Из этого можно сделать вывод, что причиной является обратная зависимость коэффициентов теплоотдачи излучением и конвекцией от времени процесса.

Оценка влияния колебания степени черноты и температуры газов на изменение лучистого теплообмена в газоходе с пароперегревателем показывает, что изменение степени черноты даёт до 14,6% изменения лучистого теплообмена, а изменение температуры – до 7,2%.

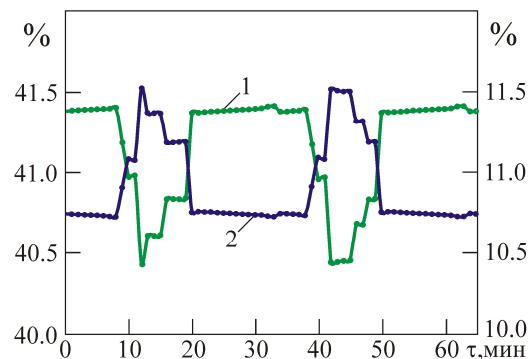


Рис. 4. Зависимость тепловосприятия поверхностей нагрева (%) от времени процесса τ , мин:

1 – пароперегреватель; 2 – водяной экономайзер

Оценка влияния изменения скорости движения продуктов сгорания и теплофизических свойств на конвективный теплообмен в водяном экономайзере показывает их приблизительно равный вклад в изменение коэффициента теплоотдачи конвекцией.

Сравнение зависимостей теплоотдачи излучением от газов к пароперегревателю и конвекцией к экономайзеру во времени указывает на обратную зависимость данных коэффициентов от времени процесса.

Изучение влияния изменений различных факторов теплового и аэродинамического режимов работы котла на коэффициент полезного действия котельного агрегата показывает его сильную взаимосвязь с адиабатической температурой горения (рис. 5).

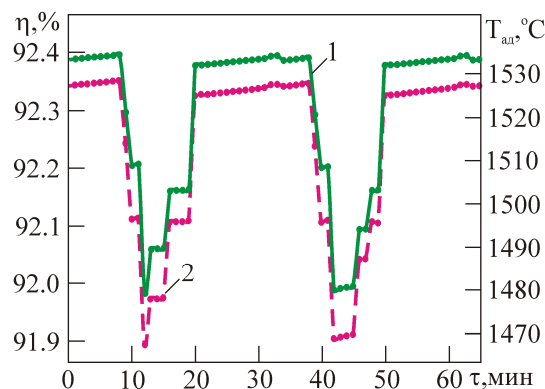


Рис. 5. График изменения КПД brutto и температуры газа в котле: 1 – кривая КПД brutto (%); 2 – кривая температура на выходе из топки (°C)

Экономическая оценка предлагаемого внедрения в технологический процесс выплавки стали на предприятии показывает положительные результаты. По данным проектов генерирующей компании «Квадра» стоимость подобного проекта может составлять порядка 5–6 млрд руб. на 2014 год. Кривые срока окупаемости при различной стоимости покупной энергии (по регионам России – от 3 до 4

руб. за 1 кВт·ч) представлены на рис. 6. По условиям предприятия ОАО «Уральская Сталь» срок окупаемости системы энергообеспечения составляет менее 5 лет. Учет высвобождаемой тепловой энергии регенеративных отборов турбины снижает данный показатель на 6%.

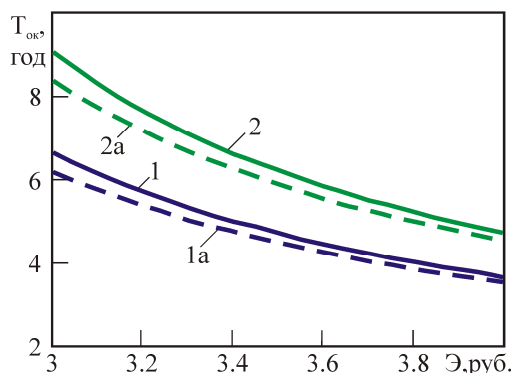


Рис. 6. Срок окупаемости $T_{ок}$ (год) проекта от стоимости покупной электроэнергии $\mathcal{E}$ (руб. за 1 кВт·ч) при различных стоимостях системы энергообеспечения: 1–5 млрд руб.; 2–6 млрд руб.; 1а, 2а – то же самое, но с учетом тепловой энергии паровых отборов турбины

Заключение

Следует отметить, что подогрев металлошихты при данном варианте энергообеспечения сокращает процесс выплавки стали на 5 мин, т.е. продолжительность работы печи под током снижается на 11,1%, что приводит к сокращению энергоемкости конечного продукта (стали) на 6–7% (в зависимости от варианта шихтовки). Добавка жидкого чугуна в ДСП в количестве 20–40% приводит к сокращению расхода электроэнергии на 17–35% [5]. Работа ДСП при таком варианте шихтовки подразумевает продувку ванны расплава кислородом, что приводит к значительному образованию печных газов, состоящих в среднем на 40% из CO и 60% из CO₂.

Подогрев металлошихты данными газами может обеспечить нагрев до 200–300°C, т.е. непосредственную интенсификацию процесса плавления. Однако подогрев металлошихты ведет к неизбежной деструкции полимерных загрязнений, содержащихся в ломе (до 10 кг на 1 т), что требует дожигания газов с резким охлаждением. Также дожигание требует 40–45% CO, содержащихся в газах. Дожи́гание необходимо осуществлять техническим кислородом, т.к. подсос воздуха в этих целях приводит к значительной перегрузке систем очистки уходящих газов и к недостаточной деактивации диоксинов и фуранов. Дополнительный расход кислорода значительно увеличивает энергоемкость стали.

При сравнении с вариантом работы ДСП с добавкой 20–40% чугуна в печь, подогревом лома отходящими газами печи и дожиганием газов в газоходе печи сокращение энергоемкости конечного продукта при автономном энергообеспечении составляет порядка 9–12%. Учет более высокого КПД выработки электроэнергии приводит к относительному понижению данного показателя дополнительно на 11,2%.

Список литературы

1. Бушуев А.Н., Кулагин А.Ю., Картавцев С.В. Энергетическая оценка показателей эффективности автономной системы энергообеспечения электросталеплавленного производства // Промышленная энергетика. 2014. №6. С. 24–29.
2. Бушуев А.Н., Шабловская Е.Б. Энергетическая оценка дожигания вредных выбросов, образуемых при предварительном подогреве загрязненного металлического лома газами умеренной температуры в электросталеплавленном производстве // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16. № 15. С. 34–41.
3. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). Изд. 3-е, перераб. и доп. СПб.: НПО ЦКТИ, 1998. 256 с.
4. Хзمالян Д.М., Каган Я.А. Теория горения и топочные устройства: учеб. пособие для вузов. М.: Энергия, 1976. 488 с.
5. Оценка энергоемкости стали, выплавленной в дуговых сталеплавильных печах / Михайловский В.Н., Агапитов Е.Б., Бигеев В.А., Каблукова М.С. // Электрометаллургия. 2011. №9. С. 17–18.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

TECHNICAL EVALUATION OF INDEPENDENT POWER SUPPLY OF ELECTRIC FURNACE STEELMAKING IMPLEMENTED AT OJSC URAL STEEL

Bushuev Anton Nikolaevich – Assistaut Professor, Orsk Humanitarian and Technological Institute (branch), Orenburg State University, Russia. E-mail: nielsen1@mail.ru.

Kartavtsev Sergey Vladimirovich – D.Sc. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. E-mail: kartavtzw@mail.ru.

Kulagin Alexey Yurievich – Ph.D. (Eng.), Deputy Head of the Steam-, Gas-, Air Supply Shop, OJSC Orsknefteorgsintez, Russia. Phone: +7 (3537) 342 271. E-mail: aukulagin@mail.ru.

Abstract. Main equipment of an independent system of the electric steelmaking division of the works on the basis of a combined cycle with metallic charge (scrap) preheating by the exhaust gases of the gas turbine is se-

lected. According to an average flow chart of parallel operation of two electric arc furnaces at the works, we analyzed the operation of the recovery boiler at a variable temperature and a variable composition of recyclable gas-

es entering the boiler after the heating chamber with cold metallic charge. Based on the analysis of the recovery boiler the overall efficiency of an independent power supply system is defined.

Keywords: electric arc furnace, recovery boiler, combined-cycle plant, power supply diagram, electric furnace steelmaking.

References

1. Bushuev A.N., Kulagin A.Yu., Kartavtsev S.V. Power performance evaluation of an independent power supply system of electric furnace steelmaking. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Power Engineering]. 2014, no. 6, pp. 24-29.
2. Bushuev A.N., Shablovskaya E.B. Power evaluation of reheating of hazardous emissions, while preheating impure scrap with gases of a moderate temperature in electric steelmaking. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan Technological University]. 2013, vol. 16, no. 15, pp. 34-41.
3. Thermal design of boilers (standard method). 3rd edition, rev. and ext. St. Petersburg: NPO TsKTI, 1998, 256 p.
4. Khzmalyan D.M., Kagan Ya.A. *Teoriya gorennya i topochnye ustroystva: ucheb. Posobie dlya vuzov* [Theory of combustion and furnaces: teaching aid for higher schools]. Moscow: Energy, 1976, 488 p.
5. Mikhailovsky V.N., Agapitov E.B., Bigeev V.A., Kablukova M.S. Assessment of the energy intensity of steel produced in electric arc furnaces. *Elektrometallurgiya* [Electrometallurgy], 2011, no. 9, pp. 17-18.

УДК 621.314.53621.314.5

ВНЕШНИЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПЕНСИРОВАННЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Хохлов Ю.И., Сафонов В.И., Лозингер П.В.

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

Аннотация. Получены зависимости, описывающие внешние и энергетические характеристики двухфазных компенсированных выпрямителей, выполненных по двум схемам: в случае подключения звена управления к шинам постоянного тока диодного выпрямителя; в случае его подключения к питающей сети через промежуточный активный преобразователь. Рассмотрены особенности характеристик в этих случаях. Реактивная мощность, потребляемая из сети, существенно зависит от способа управления. Сделан вывод о целесообразности использования первой схемы только в случае компенсированного выпрямителя.

Ключевые слова: Компенсированный выпрямитель, векторное управление, внешние характеристики, энергетические характеристики, плавное регулирование выпрямленного напряжения.

Введение

Необходимым условием ведения таких технологических процессов, как электролиз алюминия, цинка, магния и других металлов, является применение источника регулируемого постоянного напряжения [1]. Традиционно в качестве такого источника питания используются компенсированные либо некомпенсированные выпрямительные агрегаты, в которых применяется фазовый способ регулирования выпрямленного напряжения за счет использования тиристорov в качестве силовых ключей, либо дросселей насыщения в силовых цепях. Однако фазовый способ управления ведет к уменьшению коэффициента мощности за счет возрастания вместе с углом управления потребляемой выпрямителем из сети реактивной мощности даже в случае его исполнения в компенсированном варианте [2]. В патентах [3, 4] представлены способы управления выпрямительным агрегатом, позволяющие регулировать выпрямленное напряжение без уменьшения коэффициента мощности. Это осуществ-

ляется за счет внесения последовательно с напряжением сети через вольтодобавочный трансформатор напряжения управления, создаваемого дополнительно введенным автономным инвертором напряжения с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Вопросы экспериментального исследования протекающих в управляемых упомянутым способом преобразователях описаны в [5–7]. В настоящей работе проведено исследование внешних и энергетических характеристик компенсированного выпрямительного агрегата с векторным управлением.

Материалы и методы исследования

В силу возможности дальнейшего обобщения полученных результатов на многофазные схемы исследование проведено на примере двухфазного компенсированного выпрямителя. Выражения, описывающие протекающие в таком выпрямителе электромагнитные процессы, представлены в [8]. На основании этих выражений получены внешние и энергетические характеристики данного выпрямителя.

Схемы двухфазных нулевых компенсированных выпрямителей, в которых реализуются описанные в [3] и [4] способы, представлены на рис. 1, а и б соответственно. Схема на рис. 1, а отличается от схемы на рис. 1, б тем, что дополнительно введенный автономный инвертор осуществляет обмен активной мощностью с шинами постоянного тока компенсированного выпрямителя, а следовательно, влияет на величину выпрямленного тока. При расчете характеристик двухфазного выпрямителя это влияние учитывается дополнительной ветвью управления, подключенной к шинам постоянного тока, содержа-

щей сглаживающую индуктивность L_{dy} и источник тока I_{dy} (рис. 2).

Выражения для выпрямленного напряжения и тока преобразователя представлены в [8]. Внешние характеристики описываются уравнением:

$$U_{d*} = f(I_{dn*}), \quad (1)$$

где U_{d*} – нормированное выпрямленное напряжение выпрямителя; I_{dn*} – нормированный ток нагрузки.

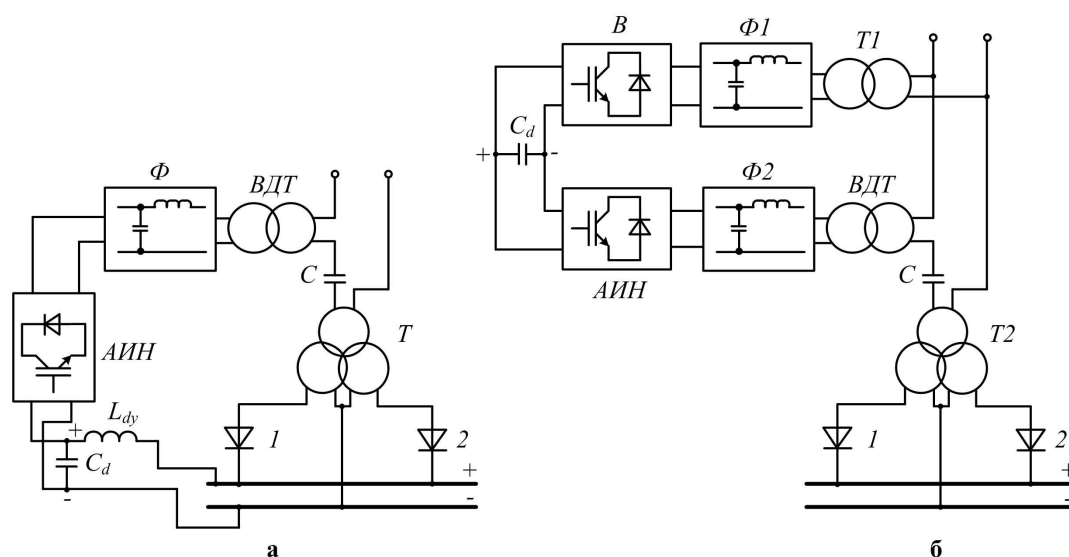


Рис. 1. Схемы двухфазных нулевых компенсированных выпрямителей с векторным управлением

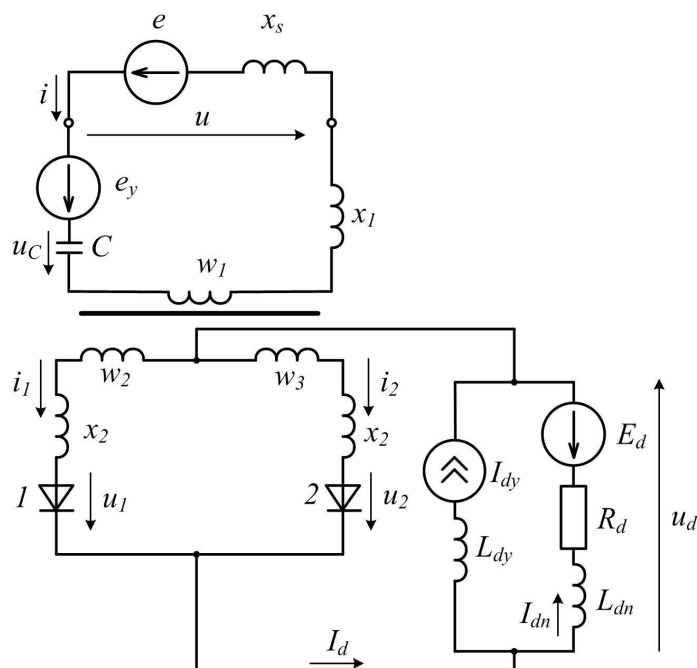


Рис. 2. Схема замещения двухфазного нулевого компенсированного выпрямителя с векторным управлением

Для выпрямителя на **рис. 1, б** справедливо условие $I_{dn*} = I_{d*}$. В случае выпрямителя на **рис. 1, а** выполняется равенство $I_{dn*} = I_{d*} - I_{dy*}$. Мощность управления P_{dy*} , потребляемая или отдаваемая инвертором, имеет вид:

$$P_{dy*} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} (e_y \cdot i) d\theta = a \cdot \Delta_E \frac{v}{(v^2 - 1)^2} \left\{ \frac{1}{4} \frac{v^2 - 1}{v} \times \right. \\ \times [\gamma \sin(\rho - \Delta_\alpha) + \sin(2\alpha + \rho + \Delta_\alpha + \gamma) \sin \gamma] + \\ + \frac{(U_{d*})^2}{(\Delta_E k_U)^2} \sin(\rho - \Delta_\alpha) \left(\frac{1}{v} \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} - \operatorname{tg} \frac{v\gamma}{2} \right) - \\ - \frac{(I_{d*})^2}{(\Delta_E k_I)^2} \sin(\rho - \Delta_\alpha) [(1 + [v^2 - 1]k_I) \times \\ \times \left(\frac{1}{v} \operatorname{ctg} \frac{\gamma}{2} - \operatorname{ctg} \frac{v\gamma}{2} \right) + \frac{k_I}{v} (v^2 - 1)^2 \operatorname{ctg} \frac{\gamma}{2}] + \\ + \frac{U_{d*} I_{d*}}{(\Delta_E)^2 k_U k_I} \cos(\rho - \Delta_\alpha) \left[\operatorname{tg} \frac{v\gamma}{2} \times \right. \\ \times \left(\frac{1}{v} \operatorname{ctg} \frac{v\gamma}{2} - \operatorname{ctg} \frac{\gamma}{2} \right) + (1 + [v^2 - 1]k_I) \times \\ \times \operatorname{ctg} \frac{v\gamma}{2} \left(\frac{1}{v} \operatorname{tg} \frac{v\gamma}{2} - \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} \right) + \left. \left. \frac{k_I}{v} (v^2 - 1)^2 \right] \right\}. \quad (2)$$

Тогда ток нагрузки I_{dn*} определяется формулой

$$I_{dn*} = I_{d*} - \frac{P_{dy*}}{U_{d*}}. \quad (3)$$

Реактивная мощность, потребляемая выпрямителем из энергосистемы (в точке с бесконечной мощностью короткого замыкания), определяется по формуле:

$$Q_{e*} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} (e \cdot \frac{di}{d\theta}) d\theta = \Delta_E \frac{v^2}{(v^2 - 1)^2} \left\{ -\frac{1}{4} \frac{v^2 - 1}{v^2} \times \right. \\ \times [\gamma \cos(\Delta_\alpha) - \cos(2\alpha + \Delta_\alpha + \gamma) \sin \gamma] + \\ + \frac{(U_{d*})^2}{(\Delta_E k_U)^2} \cos(\Delta_\alpha) \cdot \left(\frac{1}{v} \operatorname{tg} \frac{v\gamma}{2} - \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} \right) - \\ - \frac{(I_{d*})^2}{(\Delta_E k_I)^2} \cos(\Delta_\alpha) (1 + [v^2 - 1]k_I) \times \\ \times \left(\frac{1}{v} \operatorname{ctg} \frac{v\gamma}{2} - \operatorname{ctg} \frac{\gamma}{2} \right) + \frac{U_{d*} I_{d*}}{(\Delta_E)^2 k_U k_I} \sin(\Delta_\alpha) \times \\ \times \left[\operatorname{tg} \frac{v\gamma}{2} \cdot \left(\frac{1}{v} \operatorname{ctg} \frac{\gamma}{2} - \operatorname{ctg} \frac{v\gamma}{2} \right) + (1 + [v^2 - 1]k_I) \times \right. \\ \times \left. \operatorname{ctg} \frac{v\gamma}{2} \left(\frac{1}{v} \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} - \operatorname{tg} \frac{v\gamma}{2} \right) \right] \}. \quad (4)$$

Реактивная мощность, потребляемая выпрямителем в точке подключения к питающей сети, определяется по выражению:

$$Q_{п*} = Q_{e*} - 8 \frac{q}{\pi} [(U_{d*} I_{dn*})^2 + (Q_{e*})^2], \quad (5)$$

где $q = \frac{X_S}{n^2 X_k}$ – доля приведенного сопротивления питающей сети в сопротивлении контура коммутации; $n = \frac{W_1}{W_2} = \frac{W_1}{W_3}$ – коэффициент трансформации.

Коэффициент реактивной мощности в точке подключения выпрямителя к питающей сети определяется по формуле

$$\operatorname{tg} \varphi_n = \frac{Q_{п*}}{U_{d*} I_{dn*}}. \quad (6)$$

Результаты и их обсуждение

По полученным выше соотношениям на **рис. 3** и **4** построены внешние и энергетические характеристики выпрямителя при $v=0$ (некомпенсированный выпрямитель) и $v=2$ соответственно. Характеристики получены при следующих условиях: $a = 0,5$; $\psi = \frac{\pi}{2}$; $q = 0,2$; $n = 1$.

При построении характеристик угол коммутации менялся в диапазоне $0 \leq \gamma \leq 35^\circ$, фаза управляющего напряжения – в диапазоне $0 \leq \rho \leq 180^\circ$. Характеристики приведены в относительных единицах, приведенных к базисным величинам:

$$U_\sigma = \frac{E_{km}}{\pi}; I_\sigma = \frac{E_{km}}{X_k}.$$

Для выпрямителя на **рис. 1, б** при $v=0$ внешние характеристики обладают характерным для некомпенсированного выпрямителя наклоном [2]. Увеличение фазы управляющего напряжения в диапазоне $0 \leq \rho \leq 180^\circ$ при фиксации его амплитуды приводит к смещению соответствующей внешней характеристики ближе к оси абсцисс (**рис. 3, а**). При этом до определенного угла происходит уменьшение потребляемой реактивной мощности в точке подключения к питающей сети $Q_{п*}$, а следовательно, и $\operatorname{tg} \varphi_n$, при одном и том же значении тока нагрузки (**рис. 3, в и д**). Дальнейшее увеличение фазы управляющего напряжения приводит к повышению потребляемой преобразователем реактивной мощности, что обусловлено достижением максимума углом Δ_α .

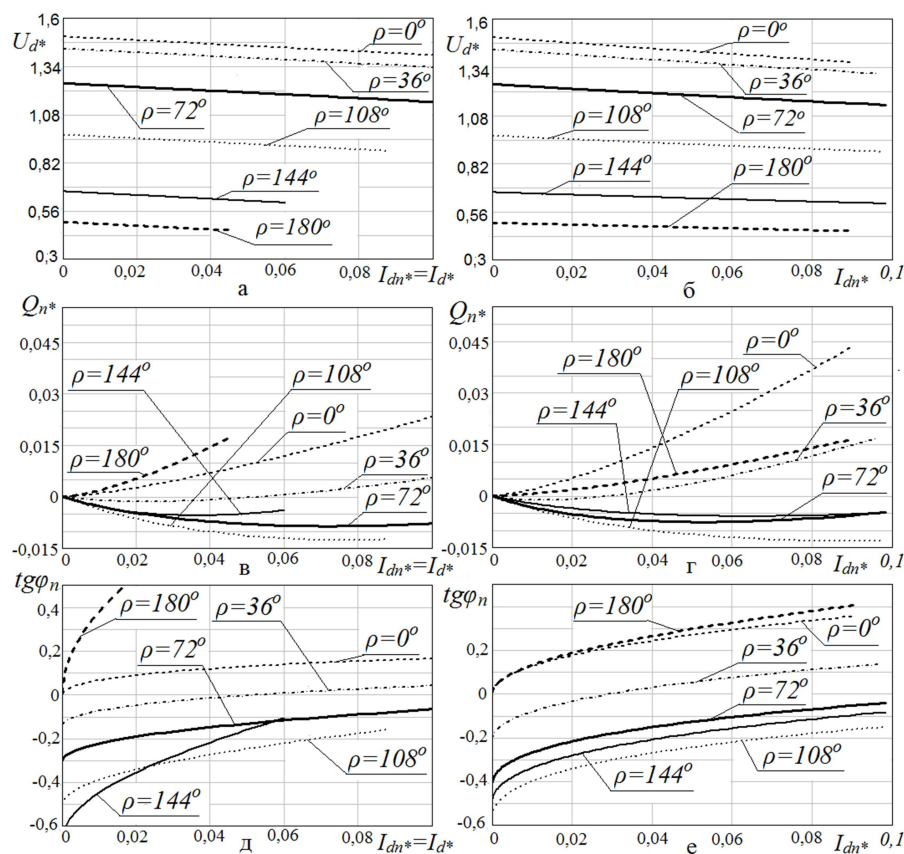


Рис. 3. Внешние и энергетические характеристики выпрямителя при $v=0$ и $a=0,5$

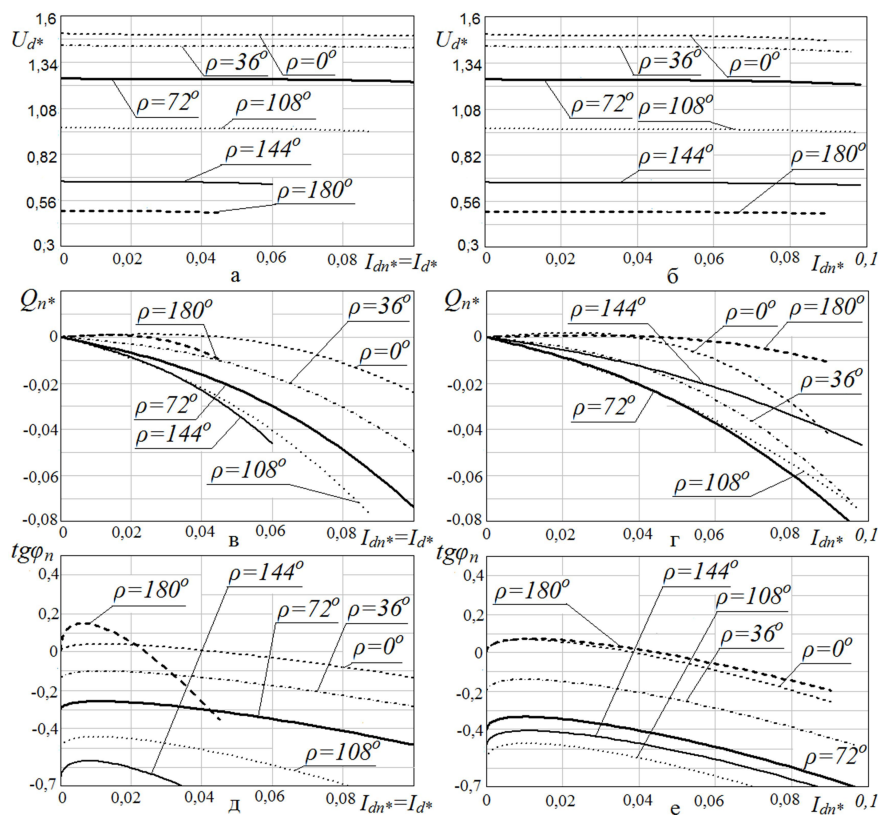


Рис. 4. Внешние и энергетические характеристики выпрямителя при $v=2$ и $a=0,5$

В случае выпрямителя на **рис. 1, а** при $v=0$ и малых углах ρ наблюдаются более мягкие внешние характеристики преобразователя (см. **рис. 3, б** по сравнению с **рис. 3, а**). Также имеется большее потребление реактивной мощности (см. **рис. 3, г, е** по сравнению с **рис. 3, в, д**). При увеличении угла ρ снижается, а затем меняет направление активная мощность, которой АИН обменивается с шинами постоянного тока. При больших значениях данного угла наблюдается увеличение жесткости внешних характеристик и снижение потребления реактивной мощности по сравнению со схемой на **рис. 1, а**.

В случае компенсированного выпрямителя при $v=2$, выполненного по схеме **рис. 1, б**, внешние характеристики обладают характерной жесткостью [2]. Изменение фазы управляющего напряжения в пределах $0 \leq \rho \leq 180^\circ$ также приводит к переходу на внешние характеристики, более близкие к оси абсцисс (**рис. 4, а**). Поскольку компенсированный выпрямитель при $v=2$ позволяет генерировать реактивную мощность, увеличение угла ρ приводит к дополнительной ее генерации с последующим ее снижением при достижении определенного угла ρ , соответствующего максимуму Δ_α (**рис. 4, в, д**). При применении схемы **рис. 1, а** смягчение внешних характеристик по сравнению со случаем **рис. 1, б** незначительно, зависимость характера изменения жесткости внешних характеристик от угла ρ аналогична случаю $v=0$. При малых углах ρ наблюдается большая генерация реактивной мощности по сравнению со случаем **рис. 1, б** при одном и том же значении $I_{\text{дн}}$. Аналогично случаю $v=0$ при достижении некоторого значения ρ меняется направление потока активной мощности через АИН и наблюдается снижение генерируемой им реактивной мощности по сравнению со случаем **рис. 1, б**.

Анализ результатов, показанных на **рис. 3**, позволяет сделать вывод о том, что для некомпенсированного выпрямителя предпочтительнее способ регулирования, представленный на **рис. 1, б**. В этом случае отсутствует влияние звена управления на жесткость внешних характеристик и на увеличение потребляемой преобразователем реактивной мощности.

Несомненным достоинством схемы на **рис. 1, а** является уменьшение количества необходимых для ее функционирования элементов. Как показывает **рис. 4**, внешние характеристики компенсированного преобразователя $v=2$ для обоих

схем отличаются незначительно. В случае схемы **рис. 1, а** при малых ρ наблюдается дополнительная генерация реактивной мощности по сравнению со схемой (см. **рис. 1, б**). Однако при одних и тех же токах нагрузки угол коммутации для схемы на **рис. 1, а** больше, чем в случае схемы на **рис. 1, б**. Это может ограничить область такого способа регулирования для многофазных схем.

Выводы

Обобщена теория двухфазного компенсированного преобразователя для случая наличия векторного управления. На основании полученных уравнений построены внешние и энергетические характеристики для двух различных схем двухфазных выпрямителей. Возможность экономии установленной мощности оборудования в случае отбора мощности управления с шин постоянного тока выпрямителя оправдывает себя в случае компенсированного выпрямителя. Полученные результаты необходимо распространить на многофазные схемы, что позволит определить целесообразность использования той или иной схемы управления выпрямителем в конкретных практических случаях.

Список литературы

1. Электротехнологические промышленные установки: учебник для вузов / И.П. Евтюкова, Л.С. Кацевич, Н.М. Некрасова, А.Д. Свенчанский; под. ред. А.Д. Свенчанского. М.: Энергоатомиздат, 1982. 400 с.
2. Хохлов Ю.И. Компенсированные выпрямители с фильтрацией в коммутирующие конденсаторы нечетнократных гармоник токов преобразовательных блоков. Челябинск: ЧГТУ, 1995. 355 с.
3. Патент RU 2333589C1. Способ управления многофазным выпрямительным агрегатом / Хохлов Ю.И., 10.09.2008. Бюл. № 25, 19.03.2007.
4. Патент RU 2402143C1. Способ управления многофазным выпрямительным агрегатом / Хохлов Ю.И., Гиззатуллин Д.Н., Осипов А.Г., 20.10.2010. Бюл. № 29, 19.03.2009.
5. Хохлов Ю.И., Гиззатуллин Д.В., Осипов А.Г. Моделирование электромагнитных процессов в компенсированном выпрямителе с обратной связью на основе АИН с ШИМ // Вестник ЮУрГУ, Серия «Энергетика». 2008. Вып. 9. № 11. С. 32–38.
6. Гиззатуллин Д.В. Экспериментальное исследование компенсированного выпрямителя с обратной связью по напряжению на основе АИН с ШИМ // Вестник ЮУрГУ, Серия «Энергетика». 2010. № 32. С. 32–35.
7. Осипов А.Г. Экспериментальное исследование компенсированного выпрямителя с векторным управлением // Вестник ЮУрГУ, Серия «Энергетика». 2010. № 32. С. 36–39.
8. Электромагнитные процессы в компенсированных преобразователях с векторным управлением / Хохлов Ю.И., Сафонов В.И., Константинов В.Д., Лонзингер П.В. // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 3. URL: <http://www.science-education.ru/117-13505>

OUTPUT AND POWER PERFORMANCE OF COMPENSATED RECTIFIERS WITH VECTOR CONTROL

Khokhlov Yuriy Ivanovich – D.Sc. (Eng.), Professor, Head of the Power Supply Systems Department of South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: Khokhlov@energo.susu.ac.ru.

Safonov Valeriy Ivanovich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: val-iv-s@yandex.ru.

Lonzinger Petr Vladimirovich – Postgraduate Student, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: lpw91@mail.ru.

Abstract. Dependences describing biphas compensated rectifiers' output and power performance were obtained in the cases of two different circuitries. The circuitries are a circuit with connection of a control link to DC buses of a diode rectifier and a circuit with its connection to a power system by means of an active PWM converter. The features arising in these cases were examined. Reactive power of a supply network significantly depends on a type of a rectifier circuit. A conclusion about the suitability of the first circuitry only in the case of the compensated rectifier was made.

Keywords: Compensated rectifier, vector control, output performance, power performance, rectified voltage slide control.

References

1. Yevtyukova I.P., Katsevich L.S., Nekrasova N.M., Svenchanskiy A.D., *Elektrotehnologicheskie promyshlennye ustanovki: Uchebnik dlya vuzov* [Electro-technological industrial equipment: textbook for universities]. Moscow: Energoatomizdat, 1982, 400 p.
2. Khokhlov Yu.I. *Kompensirovannyye vypryamiteli s filtratsiyey v kommutiruyushchie kondensatory nechetnokratnykh garmonik tokov preobrazovatelnykh blokov* [Compensated rectifiers with a filtration of odd-multiple harmonics of transforming block currents in switching capacitors]. Chelyabinsk: ChGTU, 1995, 355 p.
3. Patent RU 2333589C1. *A multiphase rectifier control method*. Inventor: Khokhlov Yu.I. Date of publication: 10.09.2008. Bulletin no. 25. Effective date for property rights: 19.03.2007.
4. Patent RU 2402143C1. *A multiphase rectifier control method*. Inventors: Khokhlov Yu.I., Gizzatullin D.V., Osipov A.G. Date of publication: 20.10.2010. Bulletin no. 29. Effective date for property rights: 19.03.2009.
5. Khokhlov Yu.I., Gizzatullin D.V., Osipov A.G. Modelirovanie elektromagnitnykh protsessov v kompensirovannom vypryamitele s obratnoy svyazyu na osnove AIN s ShIM [Modelling of electromagnetic processes of a compensated rectifier with a feedback based on VSI with PWM]. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Energetika"* [Bulletin of the South Ural State University. Power Engineering Series], 2008, iss. 9, no. 11, pp.32-38.
6. Gizzatullin D.V. Eksperimentalnoe issledovanie kompensirovannogo vypryamitelya s obratnoy svyazyu po napryazheniyu na osnove AIN s ShIM [Experimental investigation of the compensated voltage feedback rectifier on the bases of the autonomous voltage inverter with PWM]. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Energetika"* [Bulletin of the South Ural State University. Power Engineering Series], 2010, no. 32, pp.32-35.
7. Osipov A.G. Eksperimentalnoe issledovanie kompensirovannogo vypryamitelya s vektornym upravleniem [Experimental investigation of the compensated rectifier with vectorial control]. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Energetika"* [Bulletin of the South Ural State University. Power Engineering Series], 2010, no. 32, pp.36-39.
8. Khokhlov Yu.I., Safonov V.I., Konstantinov V.D., Lonzinger P.V. Elektromagnitnye protsessy v kompensirovannykh preobrazovatelnykh s vektornym upravleniem [Electromagnetic processes in a compensated converter with vector control]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2014, no. 3. URL: <http://www.science-education.ru/117-13505>

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

УДК 536.24

РАСЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ РАДИАЛЬНОГО РЕБРА ПРИ ЛУЧИСТОМ ТЕПЛООТВОДЕ С ЕГО ПОВЕРХНОСТИ

Видин Ю.В., Казаков Р.В.

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

Аннотация. Разработан приближенный аналитический метод расчета изменения температуры в радиальном ребре при радиационном теплообмене на его поверхности. Предложенный метод основан на получении нижней и верхней оценок искомого поля температуры. При этом используется интегральное линеаризующее преобразование, благодаря которому удастся существенно уменьшить влияние линейного члена в исходном дифференциальном уравнении. Полученные аналитические выражения позволяют сравнительно просто оценить максимальные и минимальные значения температуры по радиусу ребра. В расчетах используются модифицированные функции Бесселя, числовые значения которых подробно затабулированы. Как показали расчеты, расхождение между граничными значениями температуры оказывается небольшим даже при повышенных значениях радиационного числа Старка. Средняя арифметическая величина температуры между граничными температурами весьма близка к действительной.

Ключевые слова: температурное поле, радиационный теплообмен, радиальная ребристая поверхность, аналитический метод, модифицированные функции Бесселя.

Введение

В технике для интенсификации теплообмена широко используются ребреные поверхности [1]. Чаще всего ребра выполняются в радиальной форме. В условиях низкого вакуума основным видом теплоотдачи с развитых поверхностей такого типа происходит излучением. Тогда математическая постановка задачи может быть записана в следующем виде:

$$\frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} - \frac{2\sigma_{\epsilon}}{\lambda \delta} T^4 = 0; \quad (1)$$

$$T = T_0 \text{ при } r = R_1; \quad (2)$$

$$\frac{dT}{dr} = 0 \text{ при } r = R_2 \quad (3)$$

Здесь $T=T(r)$ – искомое распределение температуры ребра по его радиусу r , К; T_0 – абсолютная температура основания ребра, К; σ_{ϵ} , λ – видимый коэффициент теплообмена излучением и коэффициент теплопроводности материала тела соответственно, $\frac{Bm}{m^2 K^4}$, $\frac{Bm}{mK}$; δ – полная толщина ребра, м; R_1 , R_2 – внутренний и внешний ради-

усы ребра соответственно, м.

Решение задачи

С математической точки зрения целесообразно систему (1)–(3) привести к безразмерному виду, введя следующие величины: $\vartheta = \frac{T}{T_0}$ – безраз-

мерная температура, $\psi = \frac{r}{R_2}$ – безразмерная ра-диальная координата, которая меняется от $\psi_0 = \frac{R_1}{R_2}$ до $\psi = 1$; $Sk = \frac{2\sigma_{\epsilon} T_0^3 R_2^2}{\lambda \delta}$ – радиационное число Старка.

Тогда задача (1) – (3) преобразуется к виду

$$\frac{d^2 \vartheta}{d\psi^2} + \frac{1}{\psi} \frac{d\vartheta}{d\psi} - Sk \vartheta^4 = 0; \quad (4)$$

$$\vartheta_2 = 1 \text{ при } \psi = \psi_0; \quad (5)$$

$$\frac{d\vartheta}{d\psi} = 0 \text{ при } \psi = 1. \quad (6)$$

Дифференциальное уравнение (4) является существенно нелинейным. Поэтому получить строгое аналитическое решение системы (4)–(6)

весьма затруднительно.

Однако для инженерно-технических расчетов, как правило, достаточно ограничиться приближенным методом, который имел бы приемлемую точность и был сравнительно несложным. В этом отношении наиболее подходит способ, основанный на нахождении нижней и верхней оценок искомого поля температуры $\vartheta(\psi)$ при условии, что они оказываются достаточно близко расположенными друг к другу. Для этого целесообразно трансформировать выражение (4), используя интегральное линеаризующее преобразование, предложенное в работах [2, 3]. Согласно рекомендуемому подходу в рассматриваемом случае нужно ввести новую зависимую переменную $U=U(\psi)$, связанную с $\vartheta = \vartheta(\psi)$ соотношением

$$U(\psi) = \int_1^{\vartheta(\psi)} \frac{d\eta}{\eta^4} = \frac{1}{3}(1 - \vartheta^{-3}), \quad (7)$$

то есть

$$\vartheta(\psi) = \sqrt[3]{\frac{1}{1 - 3U(\psi)}}. \quad (8)$$

С учетом (7) задача (4)–(6) принимает вид

$$\frac{d^2U}{d\psi^2} + \frac{1}{\psi} \frac{dU}{d\psi} + 4\vartheta^3 \left(\frac{dU}{d\psi} \right)^2 - Sk = 0, \quad (9)$$

$$U=0 \text{ при } \psi=\psi_0, \quad (10)$$

$$\frac{dU}{d\psi} = 0 \text{ при } \psi=1. \quad (11)$$

Нелинейный комплекс $F(\psi) = 4\vartheta^3 \left(\frac{dU}{d\psi} \right)^2$, появившийся в преобразованном уравнении (9), имеет более слабое математическое влияние, чем величина ϑ^4 в исходном уравнении (4), что обусловлено в определенной степени граничным соотношением (11).

Функцию $F(\psi)$, входящую в зависимость (9), можно рассматривать с функциональной точки зрения как некоторый внутренний положительный источник тепла, действующий постоянно в ребре. Поэтому, если в первом приближении его не учитывать, то интегрирование системы (9)–(11) позволит определить $U(\psi)$, а затем и температуру $\vartheta(\psi)$, которая при принятом допущении будет являться нижней границей для фактического распределения температуры.

Очевидно, что при условии $F(\psi) = 0$ решение для функции U принимает вид

$$U = \frac{Sk}{2} \left(\frac{\psi^2 - \psi_0^2}{2} - \ln \frac{\psi}{\psi_0} \right). \quad (12)$$

Следовательно, минимальное распределение температуры по поверхности радиального ребра, после подстановки (12) в (8) запишется в простой форме

$$\vartheta_{\text{наим}}(\psi) = \sqrt[3]{\frac{1}{1 + \frac{3Sk}{2} \left(\ln \frac{\psi}{\psi_0} - \frac{\psi^2 - \psi_0^2}{2} \right)}}. \quad (13)$$

Для нахождения верхней границы для искомой температуры $\vartheta(\psi)$ примем нелинейный комплекс $F(\psi)$, представляющий в уравнении (9), как отмечалось выше, некоторый условный внутренний положительный источник тепловыделения, максимально теоретически возможным, а именно

$$F(\psi) = 4 \left(\frac{dU}{d\psi} \right)^2,$$

т.е. предполагается, что $\vartheta^3(\psi) = 1$.

Тогда зависимость (9) запишется

$$\frac{d^2U}{d\psi^2} + \frac{1}{\psi} \frac{dU}{d\psi} + 4 \left(\frac{dU}{d\psi} \right)^2 - Sk = 0. \quad (14)$$

Для осуществления процедуры интегрирования задачи (14), (10)–(11) рационально ввести новую зависимую переменную на основе соотношения

$$\frac{dU}{d\psi} = W. \quad (15)$$

С учетом (15) система (14), (10)–(11) преобразуется к виду

$$\frac{dW}{d\psi} + \frac{1}{\psi} W + 4W^2 - Sk = 0, \quad (16)$$

$$W=0 \text{ при } \psi=1. \quad (17)$$

Аналитическое решение нелинейного обыкновенного дифференциального уравнения (16), относящегося к классу уравнений Риккати [4], при краевом условии (17) может быть представлено через модифицированные функции Бесселя

$$W = \frac{a}{4} \frac{K_1(a)I_1(a\psi) - I_1(a)K_1(a\psi)}{K_1(a)I_0(a\psi) + I_1(a)K_0(a\psi)}, \quad (18)$$

где параметр $a = 2\sqrt{Sk}$.

Далее, используя зависимость (15), (18) и условие (10), нетрудно получить выражение для промежуточной функции $U(\psi)$

$$U(\psi) = \ln \sqrt[4]{\frac{K_1(a)I_0(a\psi) + I_1(a)K_0(a\psi)}{K_1(a)I_0(a\psi_0) + I_1(a)K_0(a\psi_0)}}. \quad (19)$$

Подставляя теперь (19) в (8), удастся вывести верхнюю аналитическую оценку для искомого распределения температуры вдоль радиального ребра

$$\vartheta_{\max} = \sqrt[3]{\frac{1}{1 + 3 \ln \sqrt[4]{\frac{K_1(a)I_0(a\psi_0) + I_1(a)K_0(a\psi_0)}{K_1(a)I_0(a\psi) + I_1(a)K_0(a\psi)}}}}. \quad (20)$$

Согласно выражению (20) наибольшая температура на вершине радиального ребра ($\psi=1$) может быть рассчитана по формуле

$$\vartheta_{\max}(\psi=1) = \sqrt[3]{\frac{1}{1 + 3 \ln \sqrt[4]{\frac{K_1(a)I_0(a\psi_0) + I_1(a)K_0(a\psi_0)}{K_1(a)I_0(a) + I_1(a)K_0(a)}}}}. \quad (21)$$

Однако, учитывая, что согласно теории Бесселевых функций [8] сумма $K_1(a)I_0(a) + I_1(a)K_0(a) = \frac{1}{a}$, решение (21) значительно упрощается

$$\vartheta_{\max}(\psi=1) = \sqrt[3]{\frac{1}{1 + 3 \ln \sqrt[4]{a[K_1(a)I_0(a\psi_0) + I_1(a)K_0(a\psi_0)]}}}. \quad (22)$$

Если необходимо несколько поднять нижнюю граничную температурную кривую, вычисляемую по (13), то это может быть выполнено на основе второго приближения

$$\vartheta_{\min} = \sqrt[3]{\frac{1}{1 + \frac{3}{b} \ln \frac{K_1(a)I_0(a\psi_0) + I_1(a)K_0(a\psi_0)}{K_1(a)I_0(a\psi) + I_1(a)K_0(a\psi)}}}, \quad (23)$$

где параметры a и b соответственно равны $a = \sqrt{bSk}$; $b = 4\vartheta_{\text{наим}}^3(\psi=1)$,

причем значение температуры $\vartheta_{\text{наим}}(\psi=1)$ находится по выражению (13)

$$\vartheta_{\text{наим}}(\psi=1) = \sqrt[3]{1 + \frac{3}{2} \left(\ln \frac{1}{\psi_0} - \frac{1 - \psi_0^2}{2} \right)}. \quad (24)$$

Следует отметить, что формула (23) получена

по той же методике, что и решение (21).

Как правило, поле между температурными кривыми, рассчитываемыми по (21) и (23), оказывается очень узким. Следовательно, эти две зависимости позволяют получить весьма близкие оценки истинного распределения температуры как «сверху», так и «снизу» (см. **таблицу**).

Модифицированные функции Бесселя первого рода $I_n(x)$ и второго рода $K_n(x)$ нулевого и первого порядка ($n=0; 1$) хорошо изучены и весьма подробно заатабулированы, например [5–7].

Кроме этого названные функции могут быть представлены в виде следующих расчетных зависимостей [5–7]:

$$I_0(x) = 1 + \frac{1}{(1!)^2} \frac{x^2}{4} + \frac{1}{(2!)^2} \left(\frac{x^2}{4} \right)^2 + \frac{1}{(3!)^2} \left(\frac{x^2}{4} \right)^3 + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(n!)^2} \left(\frac{x^2}{4} \right)^n; \quad (25)$$

$$I_1(x) = \frac{x}{2} + \frac{1}{2!} \left(\frac{x}{2} \right)^3 + \frac{1}{2!3!} \left(\frac{x}{2} \right)^5 + \frac{1}{3!4!} \left(\frac{x}{2} \right)^7 + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!(n+1)!} \left(\frac{x}{2} \right)^{2n+1}; \quad (26)$$

$$K_0(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(n!)^2} \left(\frac{x^2}{4} \right)^n \sum_{K=1}^n \frac{1}{K} - \left(\gamma + \ln \frac{x}{2} \right) I_0(x); \quad (27)$$

$$K_1(x) = \left(\gamma + \ln \frac{x}{2} \right) I_1(x) + \frac{1}{x} - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!(n+1)!} \left(\frac{x}{2} \right)^{2n+1} \left(\sum_{K=1}^{n+1} \frac{1}{K} - \frac{1}{2n+2} \right), \quad (28)$$

где γ означает постоянную Эйлера, равную $\gamma=0,57721566$.

Модифицированная функция Бесселя второго рода первого порядка $K_1(x)$ может быть представлена также в более простом виде:

$$K_1(x) = \frac{\frac{1}{x} - I_1(x)K_0(x)}{I_0(x)}.$$

В большинстве случаев, встречающихся в практических расчетах, аргумент x в формулах (25)–(28) существенно упрощается. Тогда вместо бесконечных сумм (25), (26) используются усеченные ряды, учитывающие максимум первые четыре слагаемых, т.е.

$$I_0(x) = \sum_{n=0}^4 \frac{1}{(n!)^2} \left(\frac{x^2}{4} \right)^n, \quad (29)$$

$$I_1(x) = \sum_{n=0}^4 \frac{1}{n!(n+1)!} \left(\frac{x}{2} \right)^{2n+1}. \quad (30)$$

При $x < 2$ число первых весовых слагаемых в выражениях (29) и (30) оказывается еще меньше.

Результаты расчета нижних и верхних граничных значений безразмерной температуры радиального ребра в сечениях $\psi=0,75$ и $\psi=1$ для вариантов $Sk=1,0; 1,5; 2,0$ при $\psi_0=0,5$.

Номер расчетной зависимости	$Sk=1$		$Sk=1,5$		$Sk=2,0$	
По ф-ле (13)	0,900	0,878	0,862	0,835	0,830	0,800
По ф-ле (23)	0,912	0,890	0,882	0,854	0,856	0,822
По ф-ле (22)	0,917	0,895	0,893	0,864	0,874	0,840

Выводы

1. Числовые различия между наименьшими и наибольшими значениями температуры при умеренных числах Старка почти отсутствуют.
2. С возрастанием радиационного числа Старка «вилка» между $\vartheta_{\text{наим}}$ и $\vartheta_{\text{наиб}}$ несколько возрастает. Однако по абсолютной величине не-

вязки $\Delta\vartheta = \vartheta_{\text{наиб}} - \vartheta_{\text{наим}}$ оказывается с инженерной точки зрения небольшими.

Список литературы

1. Керн Д., Краус А. Развитие поверхности теплообмена. М.: Энергия, 1977. 461 с.
2. Видин Ю.В. Инженерные методы расчета процессов теплообмена. Красноярск: КрПИ, 1974. 145 с.
3. Видин Ю.В. Инженерные методы теплопроводности. Красноярск: Изд-во Красноярск. гос. ун-та, 1992. 96 с.
4. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. М.: Наука, 1976. 576 с.
5. Видин Ю.В. Краткий справочник по тепломассообмену. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2007. 170 с.
6. Абрамовиц М., Стиган И. Справочник по специальным функциям. М.: Наука, 1979. 830 с.
7. Сегал Б.И., Семендяев К.А. Пятизначные математические таблицы. М.: Физматгиз, 1962. 450 с.
8. Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. М.: Физматгиз, 1963. 1100 с.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

CALCULATION OF TEMPERATURE CHANGES OF A RADIAL RIB IN CASE OF RADIANT HEAT REMOVING FROM ITS SURFACE

Vidin Yury Vladimirovich – Ph.D. (Eng.), Professor, Siberian Federal University, Russia.

Kazakov Roman Vladimirovich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Siberian Federal University, Russia. E-mail: roman.kazakov@list.ru

Abstract: An approximate analytical calculation of temperature changes in the radial rib in case of radiant heat transfer on its surface is prepared. The proposed method is based on higher and lower estimate of the required temperature field. The authors use an integral linearizing transformation which contributes to a significant decrease in the effect of a linear component in the original differential equation. It is rather easy to evaluate maximum and minimum temperature along the rib radius using the resulted analytical expressions. The calculations use modified Bessel functions, whose numeric values are tabulated in detail. According to the calculations, a difference in limit temperature values is minor even at increased values of the Stark radiation number. A temperature arithmetic mean of limit temperatures is rather close to a real one.

Keywords: temperature field, radiant heat transfer, radial ribbed surface, analytical method, modified Bessel functions.

References

1. Kern D., Kraus A. *Razvitye poverkhnosti teploobmena* [Developed heat exchange surfaces]. Moscow: Energiya, 1977, 461 p.

2. Vidin Yu.V. *Inzhenernye metody rascheta protsessov teploobmena* [Engineering methods of calculating heat transfer processes]. Krasnoyarsk: KrPI, 1974, 145 p.
3. Vidin Yu. V. *Inzhenernye metody teploprovodnosti* [Engineering methods of thermal conductivity]. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State University, 1992, 96 p.
4. Kamke E. *Spravochnik po obyknovennym differentsialnym uravneniyam* [Handbook of ordinary differential equations]. Moscow: Nauka, 1976, 576 p.
5. Vidin Yu.V. *Frankiy spravochnik po teplomassoobmenu* [Quick reference guide for heat and mass transfer]. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2007, 170 p.
6. Abramovits M., Stigan I. *Spravochnik po spetsialnym funktsiyam* [Handbook of special functions]. Moscow: Nauka, 1979, 830 p.
7. Segal B.I., Semendyaev K.A. *Pyatiznachnye matematicheskie tablitsy* [Five-figure mathematical tables]. Moscow: Gosudarstvennoe izdatelstvo fiziko-matematicheskoy literatury, 1962, 450 p.
8. Gradshtein I.S., Ryzhik I.M. *Tablitsy integralov, summ, ryadov i proizvedeniy* [Tables of integrals, sums, series and products]. Moscow: Gosudarstvennoe izdatelstvo fiziko-matematicheskoy literatury, 1963, 1100 p.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И СТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 625.12.033.38

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БАРХАННЫХ ПЕСКОВ, СЛАГАЮЩИХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЕ ЗЕМЛЯНОЕ ПОЛОТНО*

Корнилов С.Н.¹, Абдукамилов Ш.Ш.²¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Россия² Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта, Узбекистан

Аннотация. В данной работе приведены результаты лабораторных исследований изменения прочностных характеристик барханных песков при действии вибродинамической нагрузки. Даны количественные показатели значений удельного сцепления и угла внутреннего трения барханных песков при действии статических и вибродинамических нагрузок. Предложены зависимости определения прочностных характеристик барханных песков с учетом вибродинамической нагрузки в расчетах прочности железнодорожного земляного полотна.

Ключевые слова: барханные пески, сцепление, угол внутреннего трения, вибродинамическая нагрузка, земляное полотно, методика условно-мгновенного разрушения, трехосное напряженное состояние, лабораторные исследования.

Введение

Надежность и безопасность железнодорожного пути в значительной степени зависит от несущей способности основной площадки и устойчивости откосов земляного полотна. На основную площадку земляного полотна приходятся наибольшие величины вибродинамического воздействия проходящих поездов. Недостаточная несущая способность грунтов земляного полотна приводит к возникновению дефектов и деформаций основной площадки, что вызывает повышенные затраты на содержание пути. Практика эксплуатации железных дорог показывает, что проблема обеспечения несущей способности земляного полотна становится особенно острой на линиях, где полотно полностью отсыпано из барханных песков. Барханные пески по своим прочностным характеристикам значительно уступают крупно- и среднезернистым пескам.

Ранее выполненными исследованиями установлено [1–11], что прочность грунтов земляного полотна не является постоянной величиной. Она может изменяться в зависимости от свойств и состояния грунтов, а также от величины и интенсивности вибродинамического воздействия. Закономерность изменения удельного сцепления и угла внутреннего

трения при росте вибродинамического воздействия является основной определяющей состояния и способности барханных песков сопротивляться действию внешних нагрузок. Установление аналитической связи между изменением прочностных характеристик и величиной вибродинамического воздействия дает возможность проведения расчетов несущей способности барханных песков, уложенных в железнодорожное земляное полотно.

Для изучения степени влияния вибродинамического воздействия на прочностные характеристики барханных песков нами были проведены лабораторные исследования.

Исследования проводились на установке, сконструированной на кафедре «Управление и технология строительства» Петербургского государственного университета путей сообщения. Основой для установки послужил стабилометр типа «А» по Сипидину [10], в котором создается всестороннее гидростатическое давление. Конструкция установки моделирует вибродинамическое воздействие периодическим изменением гидростатического давления в рабочей камере стабилометра.

Величина пульсации гидростатического давления определяется следующим выражением:

$$\Delta P = P_d \sin \omega t + P_d' \sin n \omega t, \quad (1)$$

где P_d и P_d' – дополнительные давления от несущей и наложенной гармоник пульсации, МПа; ω –

* Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 14-38-50720.

угловая частота, $1/c$; t – время, c ; n – отношение угловых частот гармоник.

Полная величина всестороннего давления

$$P = P_0 + \Delta P, \quad (2)$$

где P_0 – статическое всестороннее давление, МПа.

Осциллограмма пульсации напряжений в рабочей камере стабилометра представлена на рис. 1.

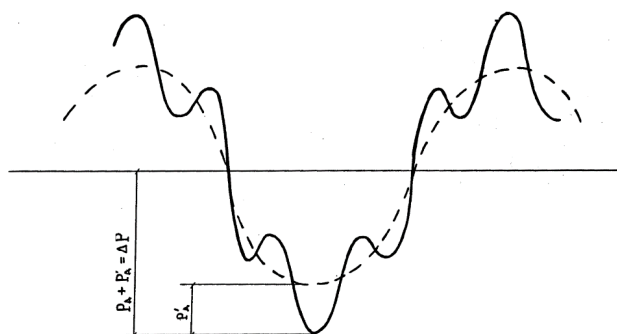


Рис. 1. Осциллограмма пульсации напряжений в рабочей камере стабилометра

Методика подготовки и испытания образцов из барханных песков

Исследование влияния вибродинамического воздействия на прочностные свойства барханных песков осуществлялось на образцах нарушенного сложения. Барханные пески привезены в лабораторию из действующей линии Учкудук – Мискен Узбекских железных дорог, где земляное полотно полностью отсыпано из этих песков.

Требуемая плотность определялась исходя из результатов лабораторного определения максимальной плотности грунтов с использованием прибора Союздорнии для стандартного уплотнения грунтов, в соответствии с ГОСТ 22733-2002 [12]. Результаты определения максимальной плотности барханных песков представлены на рис. 2. Максимальная плотность характеризуется изменением плотности сухого барханного песка с увеличением влажности. Оптимальная влажность для исследуемого песка на основе результатов наших экспериментов составила 10%.

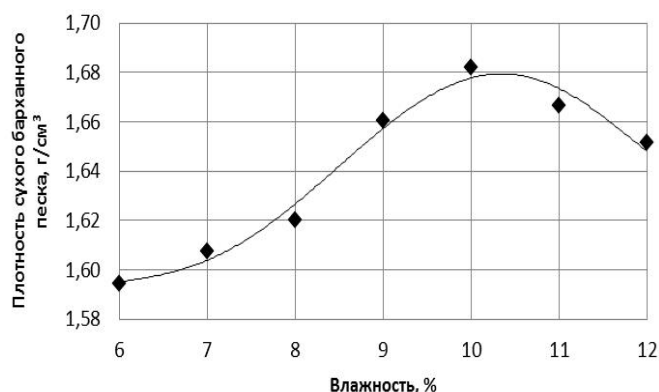


Рис. 2. Максимальная плотность барханных песков

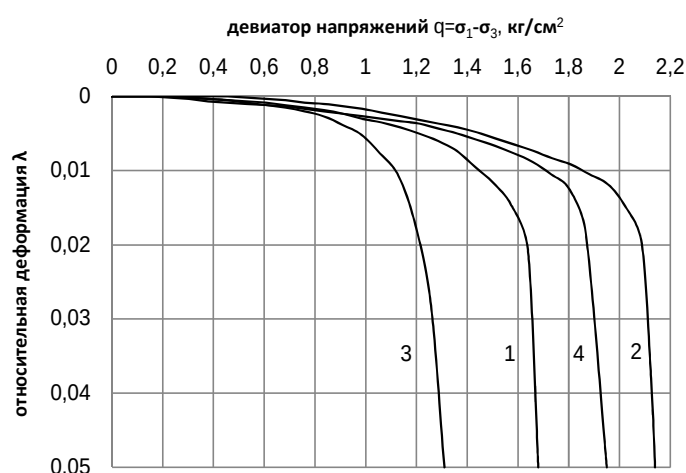


Рис. 3. Зависимость относительной деформации барханных песков от девиатора напряжений при влажности 10% и коэффициенте уплотнения, равном 1: 1 – в статике, всестороннее давление $\sigma_3=0,25$ кгс/см²; 2 – в статике, всестороннее давление $\sigma_3=0,5$ кгс/см²; 3 – в динамике, всестороннее давление $\sigma_3=0,25$ кгс/см²; 4 – в динамике, всестороннее давление $\sigma_3=0,5$ кгс/см²

В естественных условиях нагрузки на грунты земляного полотна возрастают очень быстро и действуют сравнительно короткое время. При этом процесс консолидации песчаного грунта растянут по времени, а соответственно его естественная плотность и влажность существенно не меняются в момент прохода поезда. Поэтому лабораторные исследования изменения прочности барханных песков, воспринимающих вибродинамическую нагрузку, выполнялись по методике условно-мгновенного разрушения.

По результатам испытаний каждого образца строилась графическая зависимость (рис. 3) развития относительной деформации λ от девиатора напряжений q , которые определяются по следующим формулам:

$$\lambda = \frac{\Delta h}{h}, \quad (3)$$

$$q = \sigma_1 - \sigma_3, \quad (4)$$

где h – первоначальная высота образца; Δh – величина продольной деформации; σ_1 и σ_3 – значения главных напряжений, действующих на образец из песка.

Для определения прочностных характеристик барханных песков в наших экспериментах в камере стабилометра создавалось гидростатическое давление, равное 0,25 и 0,5 кгс/см². Полученные при этих значениях бокового давления величины разрушающих избыточных напряжений позволили построить круги Мора, по огибающим к которым можно определить значения сцепления и угла внутреннего трения.

Результаты лабораторных испытаний по определению прочностных характеристик барханных песков при статике и при действии вибродинамической нагрузки представлены в таблице.

Прочностные характеристики барханных песков при действии статической и вибродинамической нагрузок

Влажность, %	c , т/м ²	φ , град	$c_{дин}$, т/м ²	$\varphi_{дин}$, град	k_c	k_φ
6	0,4	35	0,32	26	0,200	0,257
8	0,58	33	0,48	25	0,172	0,242
10	0,67	31	0,58	24	0,134	0,226
12	0,62	29	0,52	22	0,161	0,241

Для оценки влияния вибродинамического воздействия на прочностные характеристики барханных песков использовались показатели относительного снижения сцепления и угла внутреннего трения, предложенные И.В. Прокудиным [1], соответственно определяемые в процентах или долях единицы по следующим формулам:

$$k_c = \frac{c_{ст} - c_{дин}}{c_{ст}}; \quad (5)$$

$$k_\varphi = \frac{\varphi_{ст} - \varphi_{дин}}{\varphi_{ст}}, \quad (6)$$

где $c_{ст}$ и $\varphi_{ст}$ – сцепление и угол внутреннего трения при действии статической нагрузки; $c_{дин}$ и $\varphi_{дин}$ – сцепление и угол внутреннего трения при действии вибродинамической нагрузки.

В отдельных случаях использовался показатель соотношения характеристик:

$$k'_c = \frac{c_{дин}}{c_{ст}}; \quad (7)$$

$$k'_\varphi = \frac{\varphi_{дин}}{\varphi_{ст}}. \quad (8)$$

Изменения прочностных характеристик барханных песков от влажности при вибродинамическом воздействии

В лабораторных испытаниях исследовалось изменение сцепления и угла внутреннего трения в зависимости от влажности, которые определяют предельное сопротивление барханных песков. Результаты исследования зависимости показателя относительного снижения сцепления и угла внутреннего трения от влажности барханных песков представлены на рис. 4.

Полученные зависимости убедительно свидетельствуют о значительном снижении сцепления барханных песков при действии вибродинамической нагрузки. Интервал относительного снижения удельного сцепления барханных песков k_c находится в интервале 13–20%, что для песчаных грунтов следует принять как достаточно высокими. Анализ зависимости, представленной на рис. 4, показывает, что при увеличении влажности барханных песков до оптимальной величины относительное снижение удельного сцепления достигает своих минимальных значений. Однако увеличение влажности барханных песков выше оптимальной величины приводит к возрастанию относительного снижения удельного сцепления k_c . Можно объяснить это тем, что увлажнение барханных песков до оптимальной влажности дает возможность уплотнить грунт до максимальной плотности. Многочисленными исследованиями ряда ученых доказано [1, 6, 7, 9–11], что уплотнение грунтов способствует уменьшению их виброчувствительности. Совершенно очевидно, что с позиции обеспечения надежности и

устойчивости железнодорожного земляного полотна желательнo уплотнять барханный песок до максимальных значений.

Из данных, представленных на **рис. 4**, следует, что характер зависимости относительного снижения угла внутреннего трения соответствует относительному снижению удельного сцепления. Это свидетельствует о единстве природы явлений, обуславливающих снижение прочностных характеристик барханных песков при вибродинамических нагрузках. При этом результаты испытаний показывают, что угол внутреннего трения более чувствителен к вибродинамическим воздействиям по сравнению с удельным сцеплением. Интервал значений коэффициента относительного снижения угла внутреннего трения k_ϕ для барханных песков находится в пределах 22–26%.

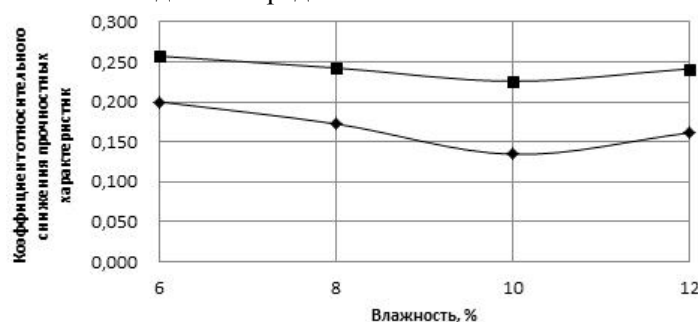


Рис. 4. Зависимость показателя относительного снижения прочностных характеристик барханных песков от влажности

Изменение прочностных характеристик барханных песков в зависимости от вибродинамического воздействия

Влияние пульсации напряжений на изменение прочностных характеристик барханных песков исследовалось на образцах, изготовленных из барханных песков с оптимальной влажностью, которая равняется 10%. Объемная масса образцов соответствовала максимальному значению, определенному при стандартном уплотнении с указанной влажностью. Пульсация напряжений создавалась с помощью гидродинамического генератора пульсации напряжений с максимальной амплитудой колебаний.

Результаты исследования зависимости показателей относительного снижения сцепления и угла внутреннего трения от пульсаций напряжений представлены на **рис. 5**.

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что с возрастанием величины пульсации напряжений увеличиваются значения показателей относительного снижения сцепления и угла внутреннего трения. Следует отметить, что характер повышения k_c и k_ϕ не имеет

принципиальных различий.

Из рисунка следует, что графики удельного сцепления и угла внутреннего трения при динамике в зависимости от пульсации напряжений имеют ярко выраженный экспоненциальный характер. Кроме того, учитывая наличие прямолинейной зависимости между пульсацией напряжений и амплитудами колебаний песчаных грунтов земляного полотна, зависимости, полученные Прокудиным И.В. [1], примут следующий вид:

$$c_{дин} = c_{ст} \left[k'_c + k_c e^{-k(A_{zy} - A_n)} \right], \quad (9)$$

$$\phi_{дин} = \phi_{ст} \left[k'_\phi + k_\phi e^{-kA_{zy}} \right], \quad (10)$$

где A_{zy} – амплитуда колебаний барханных песков в рассматриваемой точке поперечного сечения земляного полотна, мкм; A_n – начальная амплитуда колебаний, мкм, для барханных песков $A_n = 440$ мкм [5]; k – коэффициент вибродеструкции при оценке вибродинамического воздействия по величине амплитуд колебаний барханных песков. Коэффициент вибродеструкции грунта определяется экспериментальным путем. Он характеризует интенсивность нарастания показателей относительного снижения прочностных характеристик барханных песков при увеличении вибродинамического воздействия.

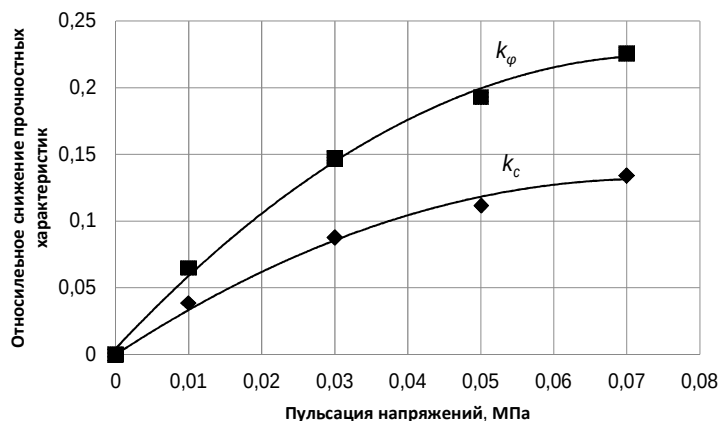


Рис. 5. Зависимость показателя относительного снижения прочностных характеристик барханных песков от величины пульсации напряжений

Зависимости (9) и (10) хорошо описывают изменение прочностных характеристик барханных песков при увеличении вибродинамического воздействия. Из данных рис. 5 следует, что имеет место полное совпадение расчетных и экспериментальных результатов. Поэтому выражения (9) и (10) рекомендуется использовать при расчетах несущей способности железнодорожного земля-

ного полотна из барханных песков.

Очевидно, что исследование влияния вибродинамических нагрузок на снижение прочностных свойств барханных песков в зависимости от региональных условий имеет большое научное и практическое значение. В настоящее время для определения несущей способности земляного полотна из барханных песков рекомендуется экспериментальное определение значений k_c и k_ϕ . Для барханных песков, распространенных в пустынях Средней Азии, в подавляющем большинстве случаев они будут близки к приведенным в **таблице**.

Заключение

Выполненные исследования изменения прочностных характеристик барханных песков под влиянием вибродинамической нагрузки позволяют сделать следующие выводы:

1. Снижение прочностных характеристик барханных песков железнодорожного земляного полотна происходит под влиянием вибродинамического воздействия, нарушающего силы контактного взаимодействия между элементарными частицами барханных песков.

2. При увеличении влажности барханных песков в сторону оптимальной величины коэффициент снижения удельного сцепления достигает своих минимальных значений, при дальнейшем увеличении влажности песков этот коэффициент возрастает. Такое положение дел наблюдается и при исследовании снижения угла внутреннего трения в зависимости от влажности барханных песков.

3. Плотность барханных песков железнодорожного земляного полотна в значительной степени влияет на снижение прочностных характеристик грунта. Только при наличии в земляном полотне объемной массы скелета грунта, с оптимальной влажностью, создаются условия, предотвращающие существенное снижение прочностных характеристик под влиянием вибродинамического воздействия.

4. По результатам экспериментальных исследований установлены максимальные значения показателей относительного снижения сцепления k_c и угла внутреннего трения k_ϕ для барханных песков различного состояния. Величины названных показателей приведены в **таблице** и рекомендуются к применению в проектных и научно-исследовательских разработках.

5. Мелкозернистые и среднезернистые пес-

ки по исследованиям О.А. Савинова, А.Ф. Колоса, М.Н. Гольдштейна [6, 9, 11] снижают свои прочностные характеристики k_c на 18–22%, k_ϕ на 13–15%, что значительно меньше зарегистрированных в наших исследованиях. При сопоставлении пылеватых песков с барханными песками наблюдается снижение удельного сцепления и угла внутреннего трения на 10–13%. В этом заключается основное отличие и определенная опасность снижения несущей способности земляного полотна из барханных песков.

6. Исследования показали, что при увеличении амплитуды колебаний увеличиваются коэффициенты относительного снижения прочностных характеристик барханных песков.

Список литературы

1. Прокудин И.В. Прочность и деформативность железнодорожного земляного полотна из глинистых грунтов, воспринимающих вибродинамических нагрузку: дис. ... д-ра техн.наук. Л.: ЛИИЖТ, 1982. 455 с.
2. Корнилов С.Н., Бабенцев Д.Ю., Довженко А.С. Проблемы эксплуатации железнодорожного транспорта ЗАО «ЛутЭК» // Горный информ.-аналит. бюл. № 8. М.: МГГУ, 2003. С.136–139.
3. Корнилов С.Н., Романюк А.И. Изменение конструкции железнодорожных путей ОАО «ММК» на основании из деревянных шпал с целью увеличения характеристик прочности и продления сроков эксплуатации // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: материалы 71 межрегион. науч.-техн. конф. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. Т.1. С.65–68.
4. Абдукамилов Ш.Ш. Исследование барханных песков в условиях трехосного напряженного состояния при воздействии вибродинамических нагрузок // Известия ПГУПС. Вып. 3. Санкт-Петербург, 2011. С. 107–114.
5. Абдукамилов Ш.Ш. Исследование колебательного процесса барханных песков, уложенных в железнодорожное земляное полотно // Известия Транссиба. Вып. 2(18). Омск, 2014. С. 75–86.
6. Гольдштейн М.Н. и др. Особенности динамических свойств грунтов при действии пульсирующей нагрузки на поверхности // Труды к VIII Международному конгрессу по механике грунтов и фундаментам. М.: Стройиздат, 1973. С. 329–331.
7. Ершов В.А. Устойчивость песчаных насыпей в связи с колебаниями, вызываемыми железнодорожным и автомобильным транспортом // Труды ЛИСИ. №37. Л., 1962. С. 76–94.
8. Красников Н.Д. Динамические свойства грунтов и методы их определения. Л.: Стройиздат, 1975. 240 с.
9. Колос А.Ф. Противодинамическая стабилизация железнодорожного земляного полотна путем цементации грунтов основной площадки: дис. ... канд.техн.наук. СПб.: ПГУПС, 2000. 163 с.
10. Сипидин В.П., Сидоров Н.Н. Исследование грунтов в условиях трехосного сжатия. Ленинград, 1963. 90 с.
11. Савинов О.А. Современные конструкции фундаментов под машины и их расчет. М.: Стройиздат, 1979. 200 с.
12. ГОСТ 22733-2002. Грунты. Методы лабораторного определения максимальной плотности.

THE RESULTS OF AN EXPERIMENTAL STUDY OF THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF BARCHAN SANDS THAT FORM THE RAILWAY SUBGRADE

Kornilov Sergey Nikolayevich – D.Sc. (Eng.), Associate Professor, Head of the Industrial Transport Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. E-mail: kornilov_sn@mail.ru.

Abdukamilov Shavkat Shukhratovich – Ph.D. (Eng.), Teaching Assistant, Tashkent Institute of Railway Engineering, Uzbekistan. E-mail: abdukamilov@mail.ru.

Abstract. This paper presents the results of laboratory research of changes in the strength characteristics of barchan sands under the action of vibrodynamic load. Quantitative values of the specific cohesion and the angle of internal friction of barchan sands under static and vibrodynamic loads are given. Dependencies to determine the strength characteristics of barchan sands considering vibrodynamic load in calculations of the railway subgrade strength are proposed.

Keywords: barchan sands, cohesion, angle of internal friction, vibrodynamic load, subgrade, method of conditional sudden destruction, triaxial stressed state, laboratory research.

References

1. Prokudin I.V. *Prochnost' i deformativnost' zheleznodorozhnogo zemlyanogo polotna iz glinistyykh gruntov, vosprinyimayushhih vibrodinamicheskikh nagruzku* [Strength and deformability of the railway subgrade from clay soils taking vibrodynamic load]. Ph.D. dissertation. Leningrad: LIIZhT, 1982, 455 p.
2. Kornilov S.N., Babentsev D.Yu., Dovzhenok A.S. Problems of operation of railway transport of CJSC LuTEK. *Gornyy informatsionno-analiticheskij byulleten'* [Mining Informational and analytical bulletin]. Moscow: Moscow State Mining University, 2003, no. 8, pp.136-139.
3. Kornilov S.N., Romanyuk A.I. Changing the design of railway tracks at OJSC MMK based on wooden sleepers to increase the strength and to extend the service life. *Aktual'nye problemy sovremennoj nauki, tekhniki i obrazovaniya: materialy 71 mezhhregional'noy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Current problems of modern science, technology and education: proceedings of the 71st interregional scientific and technical conference]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2013, vol. 1, pp. 65-68.
4. Abdukamilov Sh.Sh. The study of barchan sands in a triaxial stressed state under the influence of vibrodynamic loads. *Novosti-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya* [News of the Petersburg State Transport University], Saint Petersburg, 2011, vol. 3, pp. 107-114.
5. Abdukamilov Sh.Sh. The study of an oscillatory process of barchan sands, stacked in railway subgrade. *Zhurnal Transsib zheleznodorozhnykh issledovaniy* [Journal of Transsib Railway Studies], Omsk, 2014, vol. 2 (18), pp. 75-86.
6. Goldshtein M.N. and others. Features of dynamic properties of soils under the action of a pulsating load on the surface. *Trudy k VIII Mezhdunarodnomu kongressu po mekhanike gruntov i fundamentostroeniyu* [Proceedings for the 8th International Congress on Soil Mechanics and Foundation Engineering]. Moscow: Stroyizdat, 1973, pp. 329-331.
7. Yershov V.A. Stability of sand embankments due to fluctuations caused by railway and motor transport. *Trudy LISI* [Proceedings of LISI], no.37, Leningrad, 1962, pp. 76-94.
8. Krasnikov N.D. *Dinamicheskie svoystva gruntov i metody ikh opredeleniya* [Dynamic properties of soils and methods of their determination]. Leningrad: Stroyizdat, 1975, 240 p.
9. Kolos A.F. *Protivodinamicheskaya stabilizatsiya zheleznodorozhnogo zemlyanogo polotna putem tsementatsii gruntov osnovnoy ploshchadki* [Counter dynamic stabilization of railway subgrade by cementation of soils of the main site]. Ph.D. dissertation. St. Petersburg: PGUPS, 2000, 163 p.
10. Sipidin V.P., Sidorov N.N. *Soil analysis under triaxial compression*. Leningrad, 1963, 90 p.
11. Savinov O.A. *Issledovanie gruntov v usloviyakh trekhosnogo szhatiya* [Modern constructions of foundations under machines and their calculation]. Moscow: Stroyizdat, 1979, 200 p.
12. GOST 22733-2002. Soils. Laboratory methods for determining the maximum density.

УПРАВЛЕНИЕ, АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕТАЛЛУРГИИ

УДК 658

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ СЕКЦИЙ ВТОРИЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ МАШИНЫ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК

Сафонов Д.С.¹, Логунова О.С.²¹ ООО «Компас Плюс», г. Магнитогорск, Россия² Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Россия

Аннотация. В статье представлены результаты научного исследования по построению системы автоматизированного проектирования конструкции секций вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок. Результаты анализа показали наличие необходимого теоретического аппарата в области математического моделирования теплового состояния тел и недостаточное развитие специализированных систем автоматизированного проектирования в области металлургии. В основу системы положена математическая модель теплового состояния заготовки и выполнено формализованное описание двух требований к поперечному тепловому профилю ее поверхности. Авторы работы предлагают оригинальную постановку задачи оптимизации для поиска множества векторов переменной длины с координатами, определяющими положение форсунок в каждом межроликовом пространстве. Методика решения оптимизационной задачи содержит два основных блока: решение задачи теплопроводности и итерационный выбор наилучшего решения, удовлетворяющего критерию оптимизации. Авторами предлагается структура интерактивной системы анализа и синтеза проектных решений по выбору схемы расположения форсунок в секциях вторичного охлаждения, содержащая три сценария взаимодействия «проектировщик – система». В работе приводится анализ одного из полученных проектных решений. Результаты анализа показали, что полученное решение позволяет обеспечить сглаженный поперечный тепловой профиль поверхности заготовки. Получение оптимального решения по выбору координат форсунок в одном межроликовом пространстве требует около 300 итераций. Расчет одной схемы занимает около двух часов.

Ключевые слова: системы компьютерного инжиниринга, прогностическое моделирование, система анализа и синтеза проектных решений, машина непрерывного литья заготовок, конструкция секции вторичного охлаждения, схема расположения форсунок.

Введение

Современное промышленное производство использует технологические агрегаты, которые в своем составе имеют сложноструктурированные технологические узлы. Каждый из узлов вносит вклад в формирование качества производимой продукции или полуфабриката. Машина непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) является одним из агрегатов, используемых в металлургическом производстве, и на этапе непрерывной разливки закладываются предпосылки качества стального листа, балок и т.п., передающихся впоследствии в другие отрасли народного хозяйства.

Конструкция МНЛЗ предполагает наличие основных технологических узлов, среди которых наиболее сложными являются секции зоны

вторичного охлаждения (ЗВО). Обоснованность выбора проектных решений для схемы расположения форсунок в секциях является одним из условий обеспечения качества продукции и полуфабриката по требованию потребителя. Современное развитие аппарата математического моделирования теплового состояния заготовки позволяет выполнить разработку специализированных средств для интерактивного синтеза и последующего анализа проектных решений по конструкции секций вторичного охлаждения.

В области теории и практики проектирования и эксплуатации МНЛЗ накоплен значительный положительный опыт. Вопросы проектирования МНЛЗ и исследования температурных полей непрерывнолитых заготовок отражены в трудах зарубежных и российских исследователей. Труды

Ю.А. Самойловича, В. Thomas, Н.И. Шестакова, В.Т. Борисова определили развитие математической теории в области исследования теплового состояния заготовки. В области прогностического моделирования развития внутренних и поверхностных дефектов непрерывнолитой заготовки можно отметить труды J. Lee, J. Risso, B. Thomas, P. Du, J. Brimacombe, F. Pascon и др. В области практического применения и развития технологии непрерывной разливки следует выделить труды Д.П. Евтеева, В.А. Емельянова, В.Г. Лисиенко, В.М. Паршина, Л.В. Буланова, А.В. Куклева и др.

Однако, несмотря на проведенные исследования и значительное число публикаций в области проектирования и исследования работы ЗВО, остаются актуальными следующие проблемы:

- отсутствие комплексных методик синтеза и анализа проектных решений по схеме расположения форсунок в секциях вторичного охлаждения МНЛЗ на основе моделирования теплового состояния заготовки при заданной схеме расположения форсунок;
- отсутствие критерия для оптимизации поперечного температурного профиля на поверхности заготовки, учитывающего условия симметричности и равномерности поля температур;
- отсутствие автоматизированных систем для интерактивного проектирования схемы расположения форсунок в секциях вторичного охлаждения МНЛЗ и анализа теплового состояния заготовки в условиях новых схем расположения форсунок.

1. Цели и задачи исследования

Наличие указанных проблем определило цель научного исследования в области автоматизации проектирования конструкции секций вторичного охлаждения машин непрерывного литья заготовок: совершенствование процесса проектирования конструкции секций вторичного охлаждения МНЛЗ на основе интерактивной системы анализа и синтеза проектных решений по схеме расположения форсунок. Для достижения цели в ходе проведения научных исследований выполнено решение задач:

- проведение теоретико-информационного анализа конструкции ЗВО МНЛЗ, направленного на выявление недостатков схемы расположения форсунок при получении непрерывнолитых заготовок пониженного качества и определение требований к схеме расположения форсунок;
- построение математической модели теплового состояния непрерывнолитой заготовки в ЗВО МНЛЗ, учитывающей влияние схемы расположения форсунок в секциях вторичного охлаждения МНЛЗ на тепловое состояние заготовки, для интерактивной системы анализа и синтеза проектных решений по схеме расположения;

– проектирование и разработка интерактивной автоматизированной системы анализа и синтеза проектных решений по схеме расположения форсунок в секциях вторичного охлаждения МНЛЗ;

– проведение вычислительного эксперимента на основе интерактивной автоматизированной системы анализа и синтеза проектных решений по схеме расположения форсунок в секциях вторичного охлаждения МНЛЗ для построения библиотеки оптимальных проектных решений.

Объектом исследования в работе является конструкция секций вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок, предметом исследования – процедуры проектирования схемы расположения форсунок в секциях вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок.

Решение задач выполнялось с использованием методов: теории вероятностей и математической статистики при обработке данных, полученных в ходе пилотажного и специализированного экспериментов; математического моделирования при идентификации теплового поля непрерывнолитой заготовки в процессе ее затвердевания в ЗВО МНЛЗ в зависимости от схемы расположения форсунок и роликов в секциях вторичного охлаждения; численного решения уравнения теплопроводности с граничными условиями третьего рода при наличии эмпирических зависимостей для физико-химических характеристик и зонально-секционном построении машин непрерывного литья заготовок; объектно-ориентированного программирования, компьютерной графики при разработке программного продукта для прогностического моделирования теплового состояния непрерывнолитой заготовки в условиях заданной конструкции секций вторичного охлаждения и синтеза оптимальных проектных решений по схеме расположения форсунок в секциях вторичного охлаждения МНЛЗ.

2. Теоретико-информационный анализ конструкций машины непрерывного литья заготовок

В современной металлургической промышленности непрерывная разливка стали является доминирующим способом кристаллизации расплавленного металла в заготовки для последующей обработки. Ключевым звеном технологии непрерывной разливки является МНЛЗ, в которой происходит непосредственное формирование заготовки из подаваемого жидкого металла. Полученные заготовки поступают на последующие этапы передела, в частности в прокатное производство.

Прокат является одним из основных видов конечной продукции, реализуемой металлургическими предприятиями. Сферы его использования включают автомобильную, машинострои-

тельную, судостроительную, нефтяную и многие другие виды промышленности, что делает производство прокатной продукции важнейшей составляющей экономики страны. Непрерывная разливка, в свою очередь, является неотъемлемой частью современного технологического цикла производства прокатной продукции.

Значительные преимущества непрерывной разливки стали по отношению к разливке в изложницы, состоящие в высокой производительности и меньшем количестве технологических отходов, привели к тому, что в настоящее время производство стальных заготовок непрерывным способом составляет около 95%.

В США в течение последних трех лет выпуск стали составлял порядка 85 млн т в год, из них в среднем 98% отливалось методом непрерывной разливки. В Китае в 2013 году из 779 т выпущенной стали непрерывным методом было отлито 767 т, что также составляет около 98%. В России доля непрерывной разливки в выпуске стали несколько ниже - порядка 80% в последние три года, при годовом выпуске около 56 т.

Стремление обеспечить выпуск конкурентной продукции ведет к необходимости проектирования и ввода в эксплуатацию как новых, более совершенных МНЛЗ, участвующих в технологическом цикле, так и совершенствованию и реконструкции уже существующих. Конструкция МНЛЗ должна обеспечивать производство высококачественной продукции при соблюдении ряда часто противоречивых требований. Сложность протекающих в МНЛЗ тепловых, физических и химических процессов затрудняет поиск оптимальных проектных решений по конструкции как МНЛЗ в целом, так и ее отдельных узлов. В результате процесс проектирования новой МНЛЗ либо разработка проекта модернизации уже существующей машины требует значительных матери-

альных и временных затрат. Это делает актуальным вопрос создания новых, наукоемких средств и методов синтеза и анализа проектных решений по конструкции, в том числе разработке научных основ для создания автоматизированных систем проектирования МНЛЗ и ее отдельных узлов.

Теоретический анализ работ [1, 2] позволил выполнить классификацию машин непрерывного литья заготовок (рис. 1).

Построенная классификация позволила определить место проведенных научных исследований с точки зрения конструктивных особенностей машины непрерывного литья заготовок. В работе рассматривается конструкция секций вторичного охлаждения криволинейной машины непрерывного литья заготовок с любым соотношением сторон прямоугольного сечения и количеством ручьев.

Сложноструктурированная конструкция агрегата положила развитие крупным научным направлениям в области исследования работы машины непрерывного литья заготовок. Среди этих направлений наибольшее количество исследований проводится в областях: конструирования и моделирования работы кристаллизатора [3–5], математического моделирования теплового состояния непрерывнолитой заготовки в процессе ее нахождения в кристаллизаторе и зонах вторичного охлаждения [6–10], экспериментального исследования температурного поля поверхности заготовки [11–13], экспериментального исследования работы форсунок, используемых для подачи охладителя на поверхность заготовки [14–19], выбора схемы расстановки форсунок в секциях вторичного охлаждения [20, 21], оценки влияния интенсивности вторичного охлаждения на формирования внутренних и поверхностных дефектов заготовки [22], развития систем интеллектуальной поддержки управления непрерывной разливки стали [23].



Рис. 1. Схема классификации машин непрерывного литья заготовок

Результаты всех указанных направлений направлены на поиск оптимальных конструктивных и технологических решений для получения заготовки с заданным качеством. Несмотря на множество полученных решений, все они носят, как правило, локальный характер и очень редко рассматриваются в полной комплексной задаче, которая должна быть поставлена и решена в процессе проектирования конструкции узлов машины непрерывного литья заготовок.

Базовой составляющей конструкции зоны вторичного охлаждения является роликовая секция (рис. 2). Для обеспечения принудительного охлаждения заготовки в каждой секции между роликами устанавливают форсунки для подачи охладителя в виде водовоздушной смеси. Форсунки устанавливаются по несколько штук в каркасы, называемые коллекторами, которые выполняются в виде соединенных определенным образом труб и одновременно служат для подвода воды и воздуха к форсункам. В одно межроликовое пространство может быть установлено несколько форсунок на заданном проектном удалении друг от друга для охлаждения поверхности заготовки по всей ее ширине. Количество и типы форсунок изменяются от секции к секции, что обусловлено требованиями к режиму охлаждения заготовки. Основными характеристиками схемы расстановки форсунок являются: количество форсунок, тип форсунок, допустимый диапазон регулирования расхода охладителя, плотность орошения каждой форсунки, угол раскрытия факела форсунки.

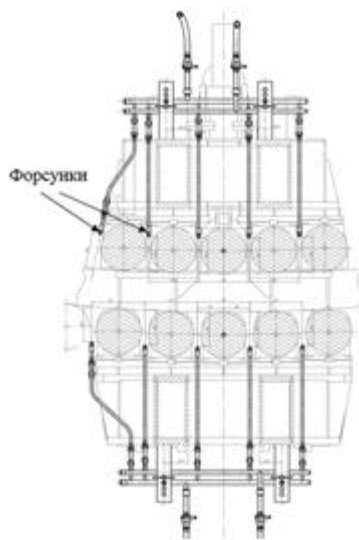


Рис. 2. Фрагмент чертежа роликовой секции

Изготовлением форсунок для МНЛЗ занимается целый ряд производителей, в частности «Lehler», «Spraying Systems», «Корад», «Уралмаш – МО», что привело к появлению на рынке

множества типов форсунок с различными характеристиками.

Одной из проблем, возникающих при проектировании конструкции секций ЗВО, является организация форсуночной системы охлаждения заготовки. Она включает в себя вопросы выбора типов используемых форсунок, их количества, позиций их установки по длине и ширине зоны вторичного охлаждения. В частности, для каждого межроликового пространства определяется: сколько и каких типов форсунки будут в нем установлены; в каких позициях в направлении, перпендикулярном направлению движения заготовки; на каком удалении от поверхности устанавливается форсунка. Разрабатываемое проектное решение должно обеспечивать режимы охлаждения поверхности заготовки для существующего и нового сортамента разливаемых сталей, обладать заданными эксплуатационными характеристиками, которые обеспечивают упрощенную схему монтажа и обслуживания.

В настоящее время известно несколько рекомендаций, полученных опытным и теоретическим путями российскими и зарубежными коллективами, которые учитываются при проектировании системы форсуночного охлаждения.

Первичные решения о количестве и типах устанавливаемых форсунок получены на основе приблизительного анализа количества тепла, которое необходимо отводить от заготовки в ЗВО для получения требуемой температуры на выходе. Основой для такого анализа являются математические модели разной сложности, при помощи которых определяется средний коэффициент теплоотдачи в той или иной секции ЗВО, необходимый для достижения заданной температуры заготовки. После этого при помощи эмпирических зависимостей коэффициента теплоотдачи от объема подачи охладителя можно оценить приблизительное количество форсунок и необходимые расходные характеристики. Вопрос выбора конкретных позиций установки форсунок, однако, требует дополнительных исследований.

Если обратиться к известному опыту, в том числе зарубежному, то в настоящее время авторами работ [1, 25] установлено, что при использовании однорядной схемы расстановки форсунок, чаще всего встречающейся в последних секциях зоны вторичного охлаждения, создается повышенная вероятность образования поперечных поверхностных и угловых трещин, поскольку такая схема расстановки форсунок приводит к различному темпу охлаждения центральной и близкой к углам части заготовки. Для ее устранения используют либо несколько форсунок в одном коллекторе, либо уве-

личивают ширину факела и высоту установки форсунок. Специалисты компании-производителя форсунок Lehler отмечают целесообразность чередования расположения форсунок в следующих друг за другом коллекторах для обеспечения как можно более равномерного теплоотвода с поверхности заготовки.

Задача выбора оптимальных проектных решений по конструкции секций вторичного охлаждения решается, если выполняется:

- проектирование новой машины непрерывного литья заготовок или отдельных секций по требованию крупной металлургической корпорации;
- реконструкция действующих машин непрерывного литья заготовок при изменении потребительских требований к продукции;
- разработка новых режимов функционирования машины непрерывного литья заготовок при расширении сортамента продукции.

Указанные работы являются типовыми для большого числа предприятий, имеющих в своем составе функционирующие машины непрерывного литья заготовок, спроектированные и построенные достаточно давно, которые сталкиваются с необходимостью выпускать высококачественную конкурентоспособную продукцию. Это требует разработки и внедрения новых проектных решений и совершенствования конструкции секций вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок.

Изучение существующих CAE-систем (ANSYS, NX CAE, ADAMS, SIMULIA) показало, что они предоставляют универсальные средства для решения расчетно-инженерных задач, в том числе анализа тепловых и напряженных полей в телах заданной формы при заданных граничных условиях [6]. В то же время, их адаптация к решению задачи выбора схемы расположения форсунок влечет за собой обширные трудозатраты, связанные со сложностью перевода исходных данных по конструкции секций вторичного охлаждения, конструкционным особенностям охлаждающих форсунок, а также системы принимаемых допущений в информационные единицы входной информации существующих систем, вероятно, превышающие разработку специализированной системы. Кроме того, для эффективного проведения расчетов по объектам масштабов МНЛЗ в универсальных системах инженерного анализа требуется наличие высокопроизводительного и дорогостоящего аппаратного комплекса, что в совокупности со сложностью формулирования задачи в терминах универсальных систем делает их использование нерациональным.

Опыт проектирования конструкции секций ЗВО предприятия «Уралмаш – Металлургиче-

ское оборудование» основан на использовании индивидуального подхода в каждом конкретном случае с соблюдением ряда общих принципов и использованием специализированных экспериментальных стендов для определения характеристик форсунок, таких как предельные расходы, эффективность охлаждения поверхности заготовки в виде усредненных значений коэффициента теплоотдачи при охлаждении опытных образцов. Полученные сведения в совокупности с такими исходными параметрами, как планируемые сечения разливаемых заготовок, марочный состав, проектная скорость вытягивания, служат основой для определения числа контуров охлаждения, их примерной протяженности.

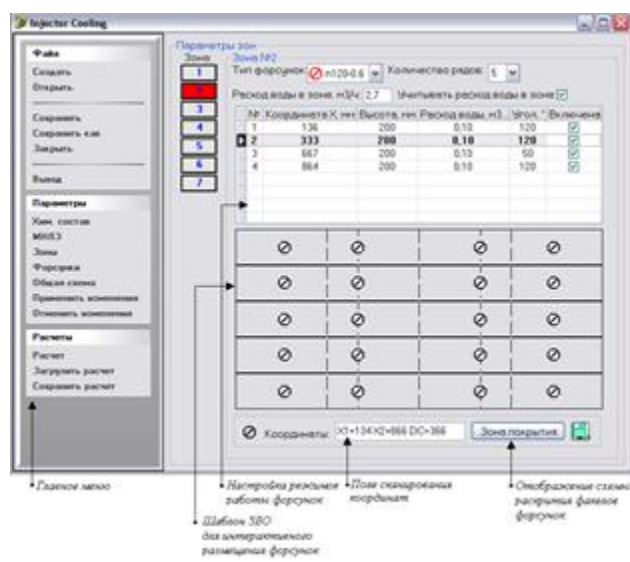
Далее осуществляется планирование точного числа форсунок в каждом контуре и схемы их расположения. На основании математических моделей теплового состояния заготовки определяют диапазоны требуемого значения коэффициента теплоотдачи для каждого контура, после чего осуществляется наполнение контура необходимым числом форсунок.

При определении конкретных позиций форсунок принимают во внимание, что факелы распыляемого охладителя не должны доходить до углов сляба ближе чем на 50 мм, количество форсунок на каждое межроликковое пространство выбирается исходя из ширины сляба, на первых 4-х метрах после выхода из кристаллизатора должно быть обеспечено орошение практически всей поверхности заготовки, далее площадь орошения можно постепенно снижать. Для разливки слябов различной ширины предусматривают возможность дискретного изменения высоты установки форсунок, что позволяет регулировать ширину охлаждаемой поверхности, не меняя горизонтальных позиций форсунок. Данный комплексный подход позволяет получать пригодные к эксплуатации проектные решения, однако остается открытым вопрос об оптимальности точного позиционирования форсунок в межроликковых пространствах.

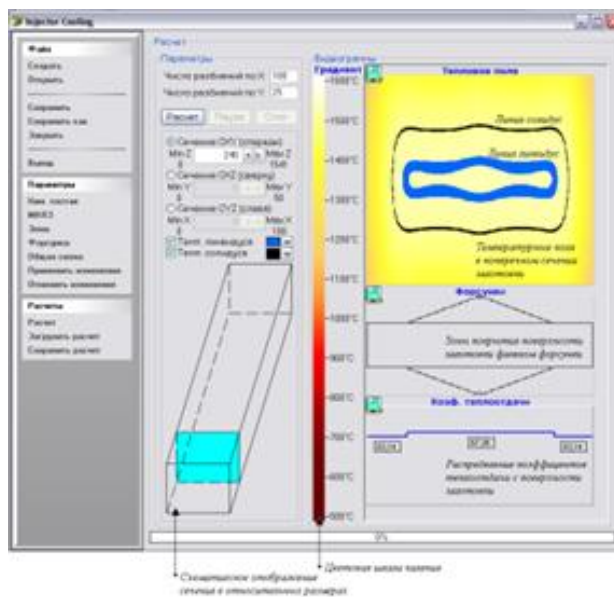
Особый подход к проектированию схемы расположения форсунок в ЗВО предлагает фирма «Siemens-VAI». Разработанная данной фирмой конструкция зоны вторичного охлаждения «SIMETAL 3D Sprays» [27] предусматривает возможность точного позиционирования форсунок по линии, направленной под углом примерно 45° к горизонту, что фактически переносит проблему выбора позиций форсунок с этапа конструирования на этап эксплуатации.

Известны проводившиеся ранее исследования, посвященные вопросам проектирования конструкции секций вторичного охлаждения МНЛЗ [21, 28].

Концепция исследований состояла в объединении двух направлений: моделирования теплового состояния непрерывнолитой заготовки при выбранной схеме расположения форсунок в секциях вторичного охлаждения. Для автоматизации вычислительных процессов был создан программный продукт Cooling & Steel. Вид окна определения координат расстановки форсунок и результатов моделирования приведен на **рис. 3**.



а



б

Рис. 3. Вид рабочих окон программного продукта Cooling & Steel: а — определение конструкции; б — результаты моделирования

Недостатками разработанной системы являются:

— положение форсунок выполняется в ручном

режиме при условии симметричности схемы, сохраняя высокие трудовые затраты на формирование схемы;

— коэффициент теплоотдачи рассматривается как некоторая усредненная величина на всю выбранную зону вторичного охлаждения, учитывая только вид выбираемых форсунок внутри одной зоны и угол раскрытия факела;

— отсутствие модуля оптимизации, позволяющего в автоматическом режиме скорректировать температурные поля по требованию снижения температурных перепадов на поверхности заготовки и в ее внутреннем сечении.

Разработка специализированных систем проектирования узлов машины непрерывнолитой заготовки остается востребованным до настоящего времени. Это вызвано потребностями проектных организаций в интегрированном использовании универсальных и специализированных систем для формирования библиотеки исходных данных, предварительного моделирования процессов и оценки возможности использования предлагаемого проектного решения.

3. Математическая модель теплового состояния заготовки как ядро системы для автоматизации проектирования конструкции секций вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок

Современные системы автоматизации проектирования агрегатов охватывают построение проектных решений на основе результатов математического моделирования и прогнозирования результатов. Современные системы автоматизированного проектирования обладают общностью в структуре построения, которая включает в себя библиотеку исходных данных, библиотеку решений, библиотеку математических моделей для описания процессов, библиотеку алгоритмов для решения математических задач, библиотеку инструментов для графического отображения результатов. Предлагаемая система автоматизации для проектирования конструкций секций вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок не нарушает принятой структуры построения подобных систем.

Подробный анализ множества научных разработок в области математического моделирования теплового состояния непрерывнолитых заготовок позволил выполнить классификацию моделей, схема которой приведена на **рис. 4**.



Рис. 4. Схема классификация математических моделей для описания теплового состояния заготовок

Согласно приведенной классификации в качестве математической основы построения интерактивной системы автоматизации проектирования конструкции секций вторичного охлаждения использована двумерная математическая модель теплового состояния заготовки в ЗВО МНЛЗ, учитывающая особенности теплопереноса в двухфазной зоне согласно квазиравновесной теории В.Т. Борисова [29], с динамически изменяющейся системой граничных условий для учета изменения условий охлаждения движущегося по технологической линии МНЛЗ двумерного сечения вследствие конструктивных особенностей выполнения МНЛЗ.

Для моделирования теплового состояния заготовки введены допущения, не изменяющие физико-технологической сущности задачи, основными из которых являются: тепловое поле всей заготовки определяется на основе моделирования состояния поперечного двумерного сечения, движущегося по длине ЗВО со скоростью вытягивания заготовки; система координат для моделирования введена согласно схеме, представленной на рис. 5, и температурное поле заготовки описывается уравнением теплопроводности

$$\rho C_s(t) \left(\frac{\partial t}{\partial \tau} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_s(t) \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_s(t) \frac{\partial t}{\partial y} \right), \quad (1)$$

где t – температура, °С; ρ – плотность стали, кг/м³; $C_s(t)$ – эффективная теплоемкость стали, Дж/(кг·град); $\lambda_s(t)$ – эффективный коэффициент теплопроводности стали, Вт/(м·град).

Эффективные величины определяются на основании квазиравновесной модели двухфазной зоны согласно теории В.Т. Борисова [29, 30]. Уравнение теплопроводности дополнено динамически изменяющимися граничными условиями:

$$\begin{aligned} \lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{y=0} &= \alpha(x, 0, \tau) (t_n(x, 0, \tau) - t_c); \\ -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{y=h} &= \alpha(0, h, \tau) (t_n(0, h, \tau) - t_c); \\ \lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=0} &= \alpha(0, y, \tau) (t_n(0, y, \tau) - t_c); \\ -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=w} &= \alpha(w, y, \tau) (t_n(w, y, \tau) - t_c), \end{aligned} \quad (2)$$

где w, h – ширина и толщина заготовки, м; t_n – температура поверхности заготовки, °С; t_c – температура среды, °С; $\alpha(x, y, \tau)$ – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² · град).

Наличие изменяющихся граничных условий третьего рода обусловлено движением сечения заготовки по ЗВО, в процессе чего поверхность сечения переходит между областями с различным видом охлаждения: орошаемыми охладителем, контакта с роликами и воздушного охлаждения (см. рис. 5).

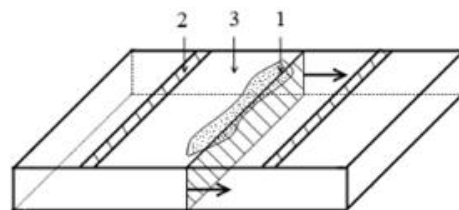


Рис. 5. Области с различным видом охлаждения поверхности заготовки: 1 – орошаемые области; 2 – области контакта с роликами; 3 – области контакта с воздухом

Интенсивность охлаждения заготовки различна между областями и является неоднородной в рамках выбранной области. В орошаемых областях охладитель, поступающий из форсунок, распределяется по поверхности заготовки неравномерно (рис. 6). Это обусловлено особенностями конструкции форсунок и приводит к различиям в плотности орошения отдельных участков поверхности.

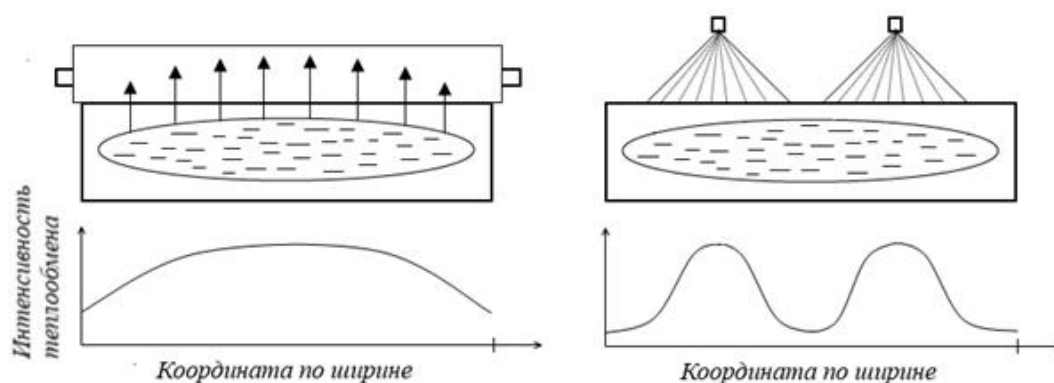


Рис. 6. Различия в интенсивности теплообмена на поверхности заготовки

Участки, находящиеся непосредственно под соплами, охлаждаются интенсивнее. В областях контакта с роликами середина поверхности заготовки под действием ферростатического давления жидкой лунки прижимается к поверхности ролика сильнее, что приводит к более интенсивному теплообмену между поверхностью заготовки и роликом в области их контакта. Временной шаг однозначно определяет позицию расчетного сечения по длине ЗВО, что позволяет определить тип области, в которой находится заданный участок поверхности расчетного сечения на заданном шаге. Отдельные участки поверхности расчетного сечения в выбранный момент времени могут находиться в областях различных типов.

Коэффициент теплоотдачи определяется модифицированными эмпирическими зависимостями Т. Nozaki, В. Thomas, R. Hardin:

$$\begin{aligned} \alpha_{\phi}(x, z) &= k \cdot 1570 \times \\ &\times \left(\sum_{i=0}^n \omega_{xi} (x - x_i) \cdot p_{zi} (z - z_i) \right)^{0.55} \times \\ &\times (1 - 0.0075(t_{\phi})); \\ \alpha_p(x) &= 4 \frac{(\alpha_{p\min} - \alpha_{p\max}) x^2}{w^2} + \alpha_{p\max}; \\ \alpha_{\phi}(x, z) &= P \frac{\varepsilon \sigma_0 (t_{n_abc}(x, z)^4 - t_{c_abc}^4)}{t_{n_abc}(x, z) - t_{c_abc}} + \\ &+ \alpha_{конв} + Q \cdot G(x, z), \end{aligned} \quad (3)$$

где $\alpha_{\phi}(x, z)$, $\alpha_p(x, z)$, $\alpha_v(x, z)$ – коэффициенты теплоотдачи в орошаемых областях, контакта с роликами и контакта с воздухом, Вт/(м²·град); w_{xi} – одномерная локальная плотность орошения форсунки i на удалении x' от сопла форсунки по оси x , л/(м·с); p_{zi} – относительная плотность ороше-

ния форсунки i на удалении z от сопла форсунки по оси z , м⁻¹; x_i , z_i – координаты проекции сопла i -й форсунки на поверхность заготовки; $i \in (1..n)$ – индексы форсунок, в область орошения которых попадает точка поверхности с координатами (x, z) ; t_{ϕ} – температура охлаждающей воды, $t_{n_abc}(x, z)$, t_{c_abc} – абсолютные температуры поверхности и среды, К; ε – приведенный коэффициент черноты тела; σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана; $G(x, z)$ – средний расход охладителя на поверхность заготовки в секции ЗВО, к которой принадлежит точка (x, z) , л/(м²·с); k , $\alpha_{p\max}$, $\alpha_{p\min}$, $\alpha_{конв}$, P , Q – эмпирические константы.

Решение системы уравнений (1)–(2) реализовано методом переменных направлений по схеме Писмена-Рэкфорда.

Для разработки методики оптимизации схемы расстановки форсунок в ЗВО было введено понятие поперечного теплового профиля грани заготовки и комплексный критерий оптимизации. Пусть по поверхности заготовки перпендикулярно направлению ее движения проведена условная линия. Температуру поверхности заготовки вдоль этой линии определим как поперечный тепловой профиль грани. Рассматриваем поперечный тепловой профиль в дискретном виде как набор температур t_i в точках x_i , $i = 1..n$, n – количество расчетных точек на линии.

С технологической точки зрения к поперечному тепловому профилю грани выдвигаются следующие требования: минимальное значение величины абсолютных перепадов температуры на единицу длины поверхности заготовки; симметричность теплового профиля относительно середины грани.

Математическая модель дополнена требованием к температурному профилю поверхности заготовки, которое в формализованной форме имеет вид

$$J = A_1 \cdot \frac{\sum_{i=l}^m \left(t_i - \frac{\sum_{i=l}^m t_i}{m-l+1} \right)^2}{\left(\frac{\sum_{i=l}^m t_i}{m-l+1} \right)^2} + A_2 \cdot \left| \frac{\frac{\sum_{i=1}^n t_i x_i}{\sum_{i=1}^n t_i} - \frac{w}{2}}{w} \right|, \quad (4)$$

где A_1, A_2 – весовые коэффициенты, определяемые экспертом.

Смысл (4) заключается в линейной комбинации двух компонент, первая из которых оценивает вариацию температур относительно среднего значения в точках профиля (из рассмотрения исключаются точки, прилегающие к углам ближе, чем на 5%, отсюда индексы l и m) и характе-

ризует равномерность теплового профиля. Графический смысл первой компоненты представлен на рис. 7.

Вторая компонента выражения (4) характеризует симметричность теплового профиля относительно середины грани путем представления температуры в точках как их массы и вычисления смещения центра «тепловой» массы относительно середины грани (рис. 8).

Преобразование (4) в целевую функцию позволило выполнить постановку задачи оптимизации для поиска положения форсунок в секциях вторичного охлаждения.

Пусть все секции вторичного охлаждения содержат K рядов форсунок, в каждом k -м ряду содержится n_k форсунок и их положение задано вектором координат $X_k(x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{kn_k})$. Обозначим z_k позицию выхода из зоны действия k -го ряда (рис. 9), $T_{z_k}(t_{1z_k}, t_{2z_k}, \dots, t_{mz_k})$ – вектор температур точек поперечного теплового профиля в позиции z_k , m – частота дискретизации по ширине заготовки, w – ширина заготовки.

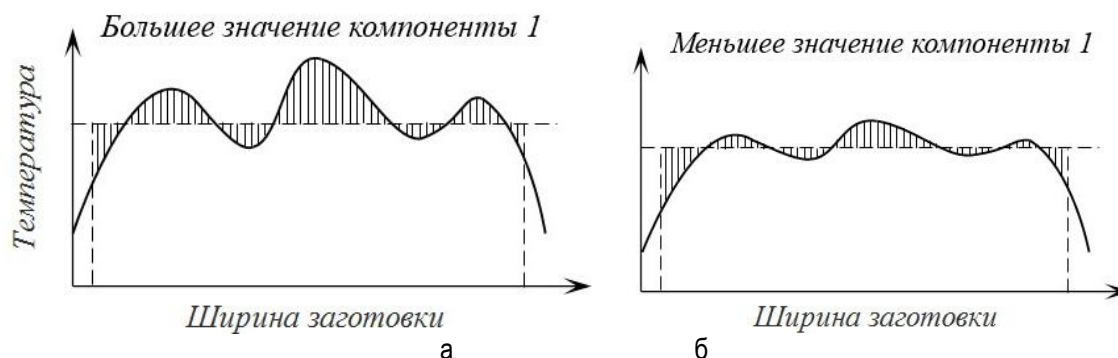


Рис. 7. Графический смысл первой компоненты критерия: а – распределение температуры по ширине заготовки при условии неравномерного охлаждения поверхности заготовки по ширине; б – распределение температуры по ширине заготовки при условии приближенно равномерного охлаждения заготовки по ширине

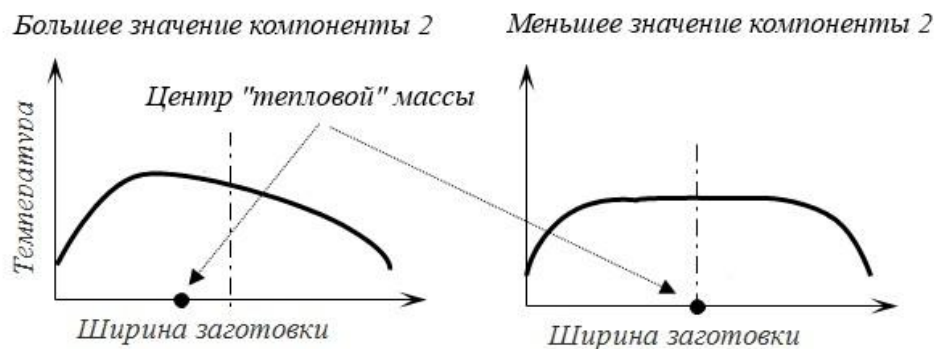


Рис. 8. Графический смысл второй компоненты критерия

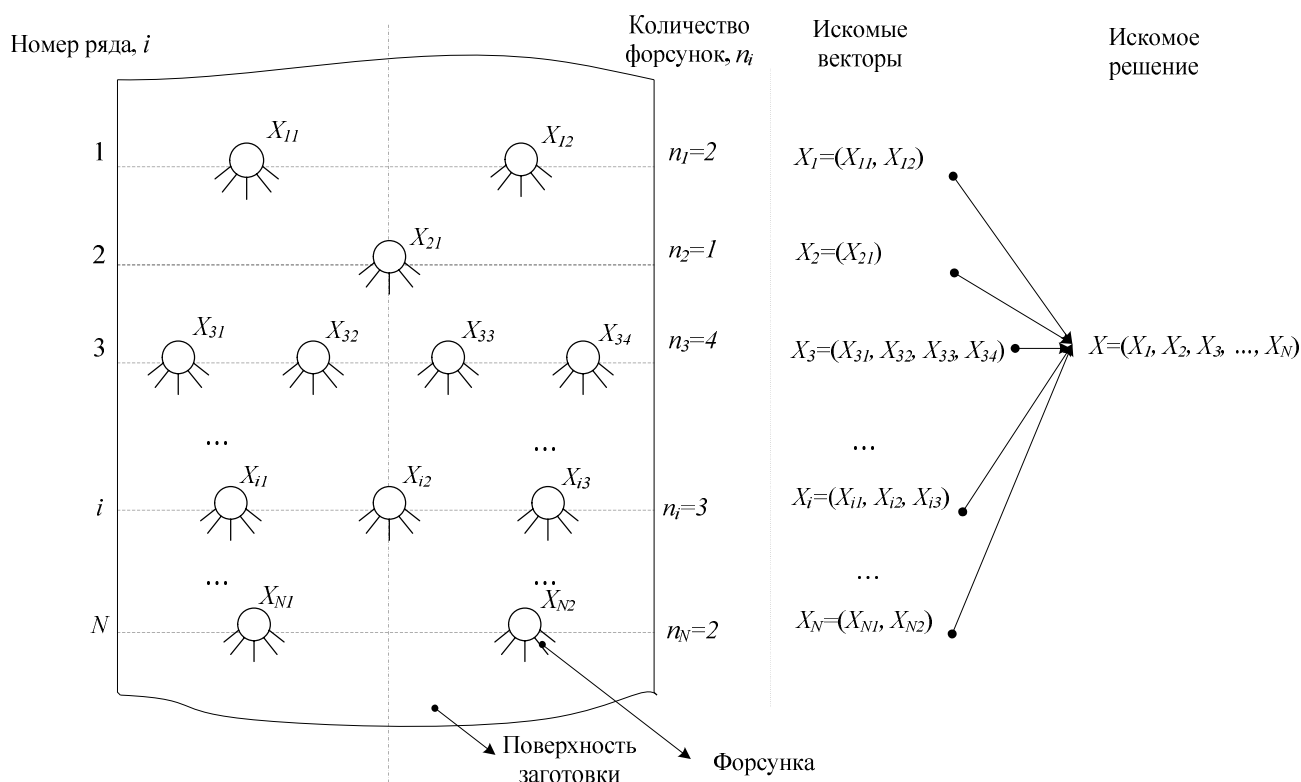


Рис. 9. Схема формирования решения задачи оптимизации конструкции секций вторичного охлаждения

Тогда задача оптимизации принимает вид: требуется найти такое множество векторов $X=\{X_1..X_k\}$, каждый элемент которого представляет собой вектор координат форсунок в одном межроликовом пространстве, координаты форсунок являются аргументами функции температуры заготовки, удовлетворяющей решению задачи (1)–(3), для которых выполняется комплексный критерий:

$$J(T_{z_k}(X_k)) \rightarrow \min, 1 \leq k \leq K$$

при выполнении ограничений

$$\begin{aligned} x_{ki-1} &< x_{ki} < x_{ki+1}, \quad 2 \leq i \leq n_k - 1; \\ 0,05w &\leq x_{ki} \leq 0,95w, \quad 1 \leq i \leq n_k; \\ x_{ki} &= 0,05p, \quad p \in N \end{aligned}$$

Пусть задана исходная схема расположения форсунок $X_0=\{X_{10}..X_{k0}\}$. Процедуру оптимизации выполняем последовательно для каждого ряда. В позиции входа в зону действия очередного ряда считаем известным тепловое состояние сечения заготовки по результатам моделирования. Запоминаем состояние моделирования в этой пози-

ции. Продолжаем моделирование теплового состояния сечения до позиции выхода.

Рассчитываем значение критерия $J(T_{z_k}(X_k))$ на выходе. Данное значение критерия получено при начальных позициях форсунок. Если выполнить откат процесса моделирования до состояния на позиции входа и внести корректировки в позиции форсунок, а затем повторить расчет до позиции выхода, то получим значение критерия $J(T_{z_k}(X'_k))$ при скорректированных позициях форсунок.

Таким образом, расчет теплового поля от позиции входа до позиции выхода является процедурой вычисления критерия $J(T_{z_k}(X_k))$ по произвольным значениям вектора X_k , что позволило воспользоваться методом направленного случайного поиска оптимального значения X_k по алгоритму наилучшей пробы.

Последовательно оптимизируя расположение форсунок в каждом ряду по ходу движения расчетного сечения, получаем оптимальную схему расположения форсунок в ЗВО. Блок-схема алгоритма оптимизации представлена на рис. 10.

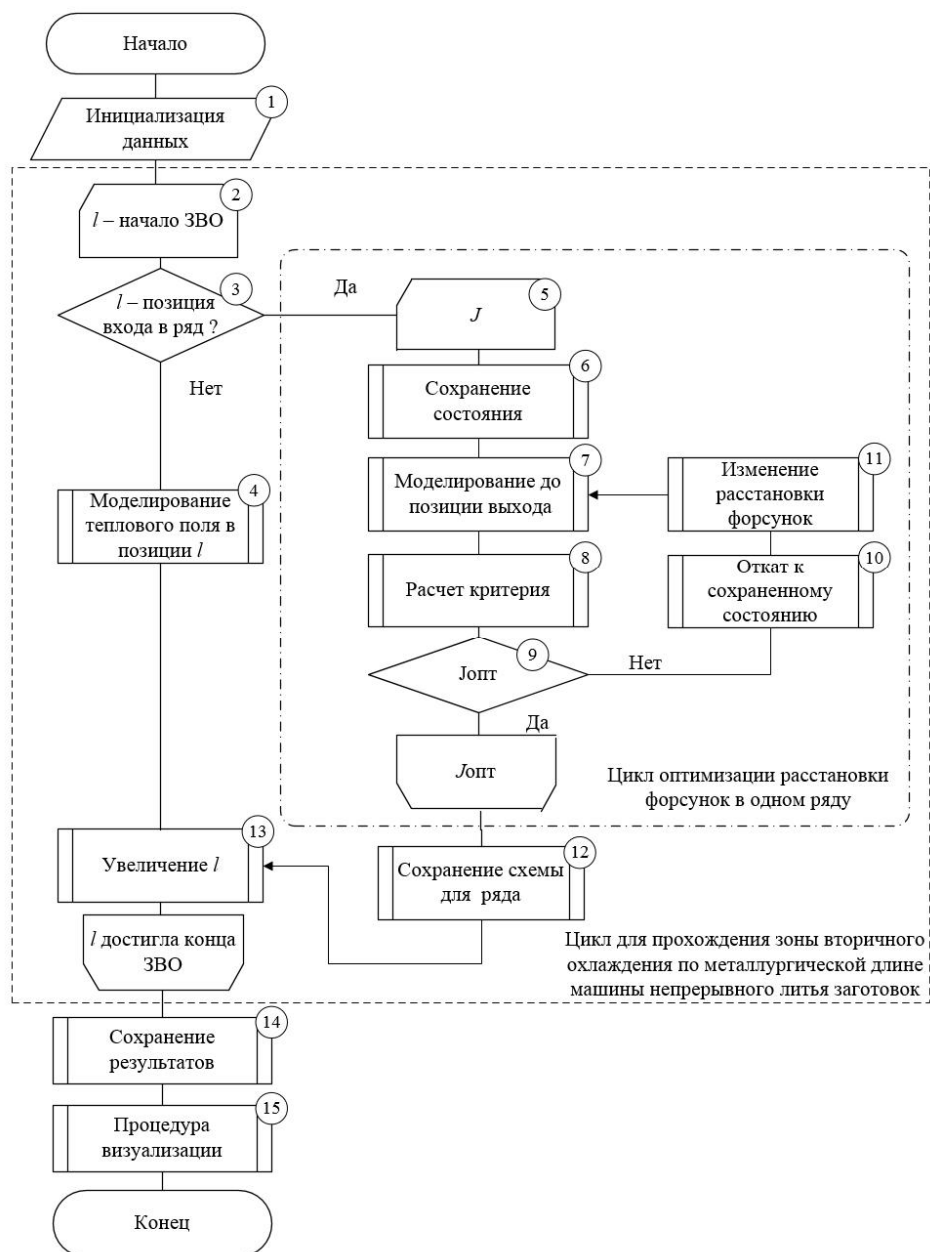


Рис. 10. Блок-схема алгоритма оптимизации схемы расположения форсунок в ЗВО МНЛЗ

На основе алгоритма выполнено проектирование и разработка интерактивной системы синтеза проектных решений по схеме расположения форсунок.

4. Структура автоматизированной системы проектирования конструкции секций вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок

Интерактивная система анализа и синтеза проектных решений включает три подсистемы (рис. 11):

- подсистема ведения нормативно-

справочной информации, включающая ведение справочника марок сталей с возможностью задания физических свойств и химического состава, ведение справочника исследуемых конструкций ЗВО с возможностью графического просмотра и редактирования параметров конструкции, ведение справочника начальных и калибровочных параметров моделирования;

- подсистема прогностического моделирования и оптимизации, выполняющая поиск оптимальной схемы расположения форсунок для выбранной конструкции ЗВО, формирование запроса на моделирование теплового состояния заго-

товки, непосредственно прогностическое моделирование теплового состояния заготовки с заданными калибровочными параметрами;

– подсистема накопления и визуализации результатов, позволяющая выполнить сохранение сведений о тепловом состоянии заготовки в ЗВО и интенсивности процессов теплообмена на ее поверхности и отобразить двумерные графики температуры поверхности граней заготовки по секциям ЗВО (подмодуль 1), графики поперечного теплового профиля граней заготовки на выходе их секций ЗВО (подмодуль 2), двумерные графики величины коэффициента теплоотдачи на поверхности граней заготовки по секциям ЗВО (подмодуль 3), двумерные графики величины теплового потока на поверхности граней заготовки по секциям ЗВО (подмодуль 4), графики изменения температур отдельных точек расчетного сечения по всей длине ЗВО (подмодуль 5),

накопительные графики количества тепла, отводимого охладителем, роликами или излучением и конвекцией (подмодуль 6).

Интерактивная система синтеза проектных решений предусматривает три основных сценария интерактивного взаимодействия проектировщик-система: заполнение и редактирование справочников конструкций ЗВО, марок сталей, начальных и калибровочных параметров моделирования; запуск процедуры оптимизации схемы расположения форсунок, состоящий из выбора входных данных из справочников и, при необходимости, их корректирования для данного запуска; анализ графически представленных выходных данных, сформированных по итогам завершенных процедур оптимизации. На рис. 12 приведены основные интерфейсные формы для организации взаимодействия «проектировщик-система».

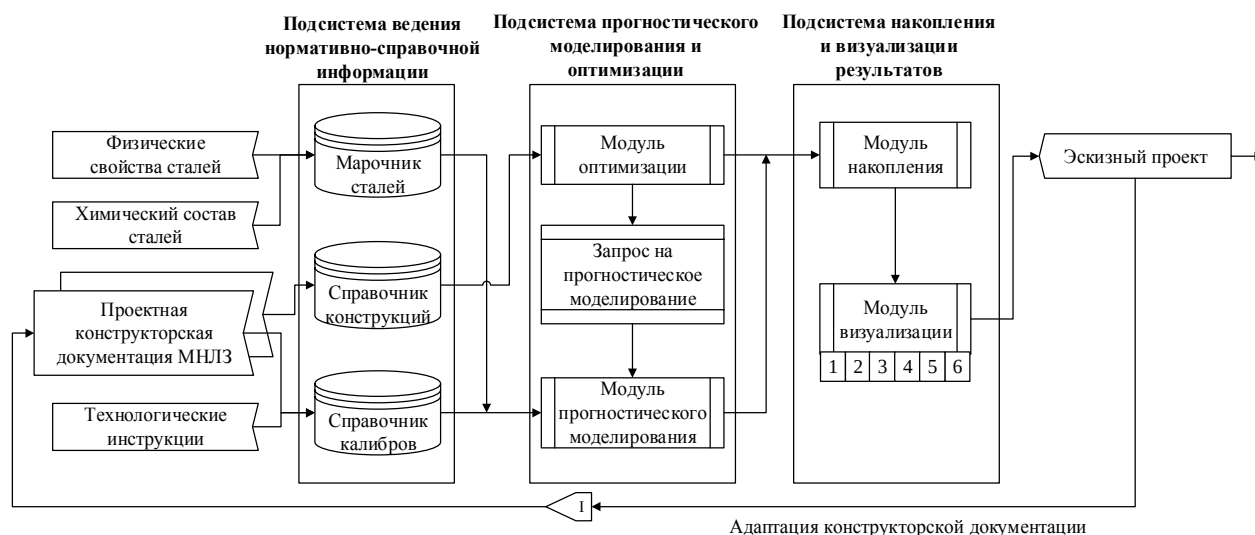


Рис. 11. Структура интерактивной системы анализа и синтеза проектных решений

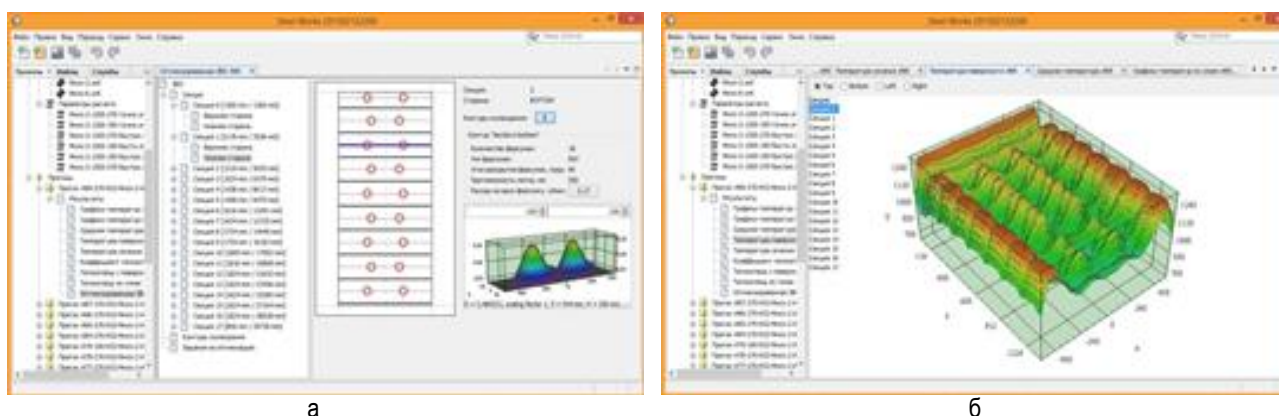


Рис. 12. Экранные формы интерактивной системы синтеза оптимальной схемы расположения форсунок в ЗВО МНЛЗ: а – форма редактирования физических свойств и химического состава стали; б – форма редактирования и просмотра параметров конструкции ЗВО

При разработке интерактивной системы синтеза проектных решений была использована объектно-ориентированная методология программирования с применением языка Java и платформы для построения графических приложений Netbeans Platform.

Разработанная интерактивная система была использована для поиска оптимальной схемы расположения форсунок и исследования тепловой работы МНЛЗ.

5. Результаты синтеза и анализа проектных решений конструкции секций вторичного охлаждения

В условиях ОАО «Уральская Сталь» для настройки прогностической модели проведены пилотажные и специализированные эксперименты для изучения формы распределения охладителя в зонах орошения [19] и температуры поверхности заготовки [31]. Специализированный эксперимент проводился путем установки измерительной планки под действующими форсунками (рис. 13). В пилотажном эксперименте проведены замеры температуры поверхности заготовки в различных точках по схеме, приведенной на рис. 14.



Рис. 13. Измерительная планка для определения распределения охладителя в области орошения форсунок

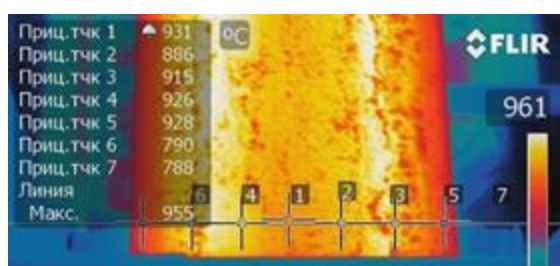


Рис. 14. Результаты измерения температуры поверхности заготовки при помощи пирометра Flir T640

По результатам исследования предложены зависимости для определения плотности орошения при моделировании теплового состояния заготовки. Результаты моделирования при использовании предложенных зависимостей плотности орошения показали отклонение температур на

поверхности заготовки от экспериментальных значений не более 5%, что позволило сделать вывод возможности использования прогностической модели теплового состояния заготовки при построении интерактивной системы анализа и синтеза проектных решений [19].

Вычислительный эксперимент по оптимизации схемы расположения форсунок был проведен для условий непрерывной разливки заготовок сечением 1200×270 мм марок сталей, принадлежащих группе К-52, при скорости вытягивания 0,9 м/мин. На рис. 15 приведены результаты сравнительного анализа теплового поля поверхности заготовки при текущей и оптимальной схемах расположения форсунок, а на рис. 16 – сравнение текущей и оптимальной схемы расположения форсунок в отдельных секциях. На рис. 17 и 18 представлены диаграммы изменения критерия оптимизации в зависимости от позиций форсунок в выделенных рядах.

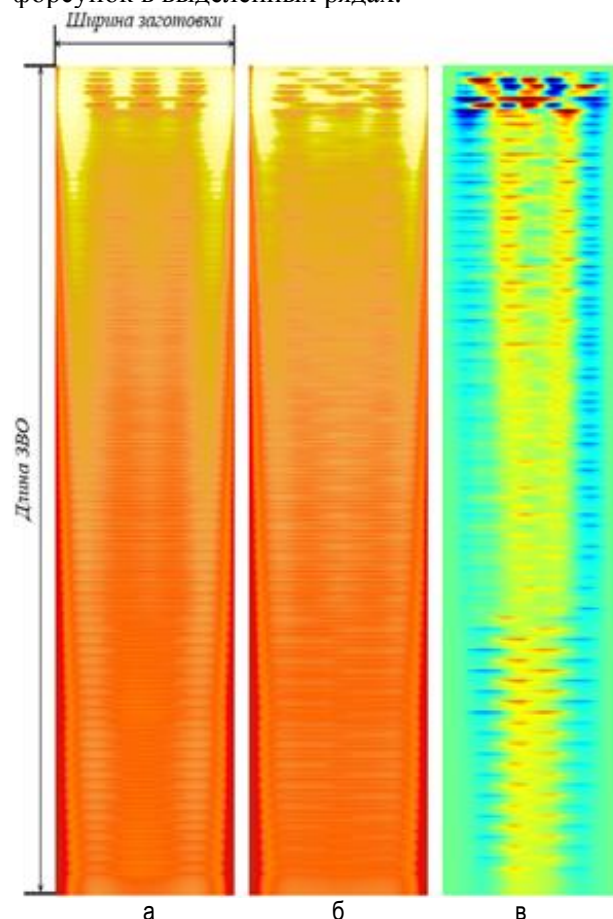


Рис. 15. Распределение температурных полей на поверхности заготовки: а – в условиях использования начальной схемы; б – в условиях оптимальной схемы расположения форсунок; в – изменение значений температуры при переходе к оптимальной схеме

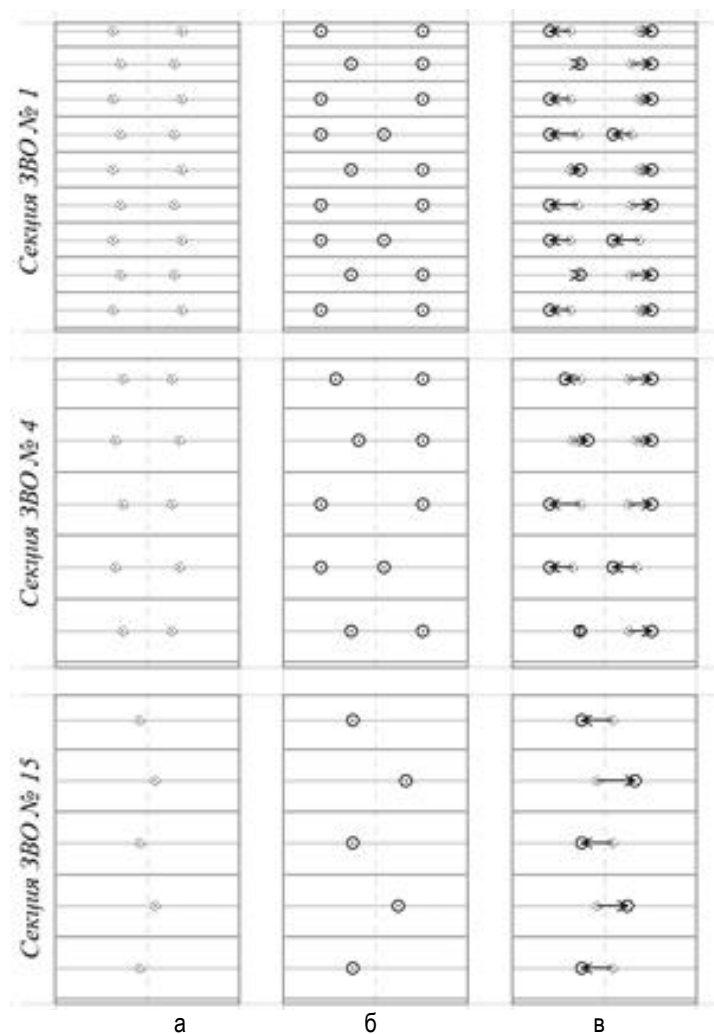


Рис. 16. Изменения в решении задачи оптимизации: а – начальное приближение; б – решение задачи оптимизации; в – значения коррекции в решении

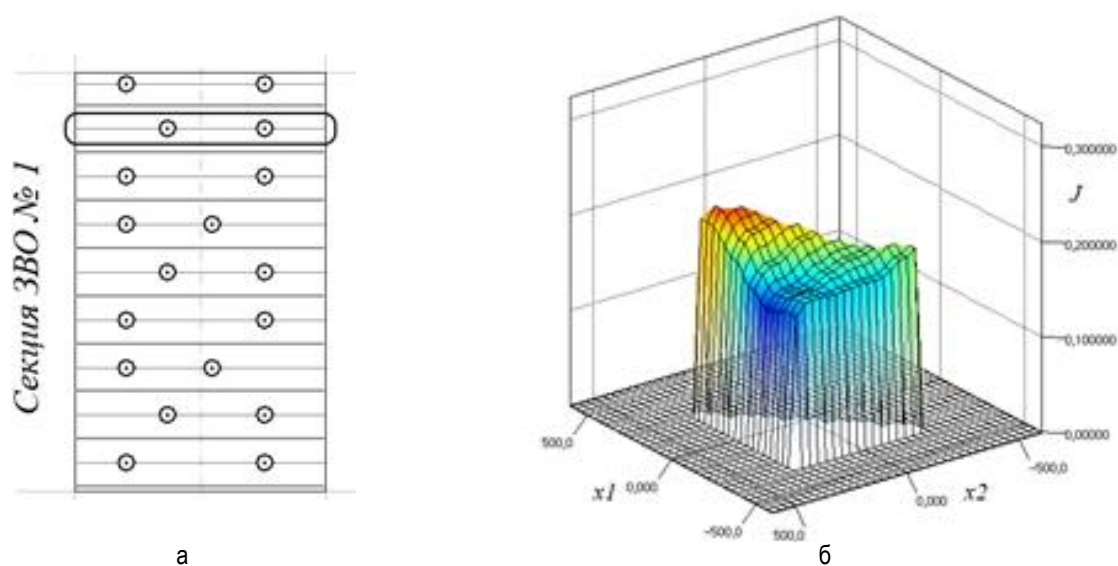


Рис. 17. Результаты оценки поведения критерия оптимальности при получении оптимальной схемы расположения форсунок (см. рис. 16) для ряда с двумя форсунками: а – схема расположения форсунок; б – диаграмма изменения критерия в выделенном ряду

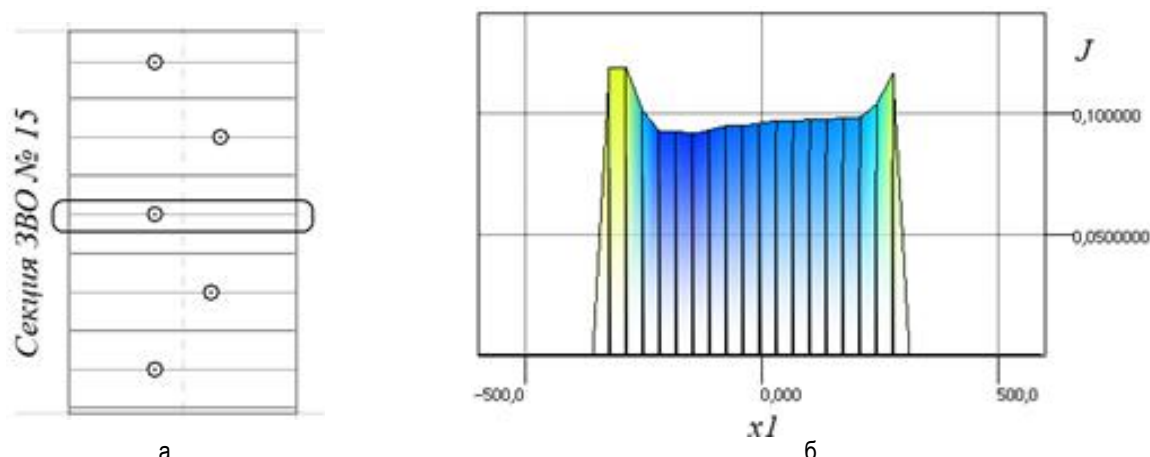


Рис. 18. Результаты оценки поведения критерия оптимальности при получении оптимальной схемы расположения форсунок (см. рис. 16) для ряда с одной форсункой: а – схема расположения форсунок; б – диаграмма изменения критерия в выделенном ряду

На основании проведенных вычислительных экспериментов установлено, что изменение марки стали, изменение скорости вытягивания заготовки в рамках технологически допустимых рабочих скоростей для заданного сечения заготовки не ведет к заметному изменению оптимального решения по схеме расположения форсунок. А существенным фактором, оказывающим влияние на оптимальное решение, является ширина заготовки.

Таким образом, разработанная интерактивная система позволила усовершенствовать процесс проектирования модернизированной конструкции секций вторичного охлаждения путем нахождения оптимальной схемы расположения форсунок средствами вычислительной техники и провести анализ тепловой работы МНЛЗ.

Заключение

Выполненный теоретико-информационный анализ влияния конструктивных особенностей секций вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок позволил определить технологические требования к профилю охлаждения заготовки. В ходе анализа определено назначение математической модели в проектировании МНЛЗ и перспективы построения интерактивной системы анализа и синтеза оптимальных проектных решений по схеме расположения форсунок в секциях вторичного охлаждения МНЛЗ.

Предложена комплексная математическая модель теплового состояния заготовки и критерий оптимизации схемы расположения форсунок, отличающийся возможностью учета усло-

вий симметричности и равномерности поля температур. Предложенная математическая модель и критерий позволили выполнить постановку задачи оптимизации и разработать методику и алгоритм для выбора оптимальной схемы расположения форсунок с целью обеспечения профиля охлаждения заготовки для получения заготовок обычного качества.

Разработана структура и выполнена программная реализация интерактивной системы анализа и синтеза оптимальных проектных решений по схеме расположения форсунок в секциях вторичного охлаждения МНЛЗ, позволяющая усовершенствовать процесс проектирования конструкции секций вторичного охлаждения МНЛЗ за счет поиска оптимальной схемы расположения форсунок ЗВО средствами вычислительной техники.

Проведены комплексные экспериментальные исследования, включающие пилотажный эксперимент по изучению температурного поля на поверхности заготовки в промышленных условиях, специализированный эксперимент по изучению распределения плотности орошения на поверхности заготовки в лабораторных условиях, вычислительный эксперимент-преобразование по синтезу проектных решений по схеме расположения форсунок для построения библиотеки и последующего использования в процессе проектирования новых конструкций, модернизации существующих и освоения новых сортов продукции.

Внедрение разработанных решений позволяет получить предполагаемый экономический эффект за счет проведения проектировочных работ и эксплуатации МНЛЗ в новых условиях в раз-
мере 3,106 млн руб. в год.

Список литературы

1. Буланов Л.В., Корзунин Л.Г. Машины непрерывного литья заготовок. Екатеринбург: Уральский центр ПР и рекламы «Марат», 2004.
2. Вдовин К.Н., Точилкин В.В., Ячиков И.М. Непрерывная разливка стали. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012.
3. Vdovin KN, Pozin AE, Petrov IE, Podosyan AA, Tochilkin VV (2013) Ingot contact with the broad mold walls in continuous slab-casting machines. *Steel in Translation* 43(7): 452–454
4. Huang X, Thomas BG (1993) Modeling of steel grade transition in continuous slab casting processes. *Metallurgical Transactions B* 24(2): 379–393
5. Berdnikov SN, Pozin AE, Podosyan AA, Berdnikov AS, Mokhov VA, Vdovin KN (2012) Improving narrow mold walls in continuous slab-casting machines. *Steel in Translation* 42(2): 180–182
6. Zhou X (2009) Heat transfer during spray water cooling using steady experiment. University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana-Champaign
7. Li C (2004) Thermomechanical Finite-Element Model of Shell Behavior in Continuous Casting of Steel. *Metallurgical and materials transactions* 35B: 57–60
8. Zhang Q (2010) A Heat Transfer and Solidification Model of Continuous Cast. *Advanced Materials Research*: 154–155
9. Horsky J, Raudensky M (2005) Measurement of heat transfer characteristics of secondary cooling in continuous casting, Hradec nad Moravici: 23–31
10. Shen H, Hardin R, MacKenzie R and [et. al] (2002) Simulation Using Realistic Spray Cooling for the Continuous Casting of Multi-component Steel. *Journal of Materials Science and Technology* 18: 123–128
11. Zhang X, Jiang Z, Tieu A and [et al.] (2009) Analysis of surface temperature and thermal stress field of slab continuous casting. *Advanced Materials Research*: 554–559.
12. Tutarovs VD, Logunova OS (2002) Analysis of the surface temperature of continuously cast ingot beyond the zones of air cooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 45(22): 4381–4399
13. Logunova OS, Matsko II, Safonov DS (2012) Thermal state simulation of the infinite body taking into account dynamic boundary conditions of the third kind. *Bull South-Ural State Univ Math Model Program Ser* 27:74–85
14. Nozaki T (1978) A Secondary Cooling Pattern for Preventing Surface Cracks of Continuous Casting Slab. *Trans. ISIJ* 18: 330–338
15. Boyle R, Frick J (2004) Implementation of modern secondary cooling technology in existing casters. *Materials of the 3rd International conference on Continuous Casting of Steel in Developing Countries*, Beijing
16. Boyle R, Frick J (2012) New Secondary Cooling Systems and Practices: Nozzles and Cooling Solutions for Continuous Casting of Steel, Lehler: 33–44
17. Hardin R, Liu K, Kapoor A and [et. al] (2003) Transient Simulation and Dynamic Spray Cooling Control Model for Continuous Steel Casting. *Metallurgical and Materials Transactions B* 34B: 297–306
18. El-Bealy M, Leskinen N, Fredriksson H (1995) Simulation of Cooling Conditions in Secondary Cooling Zones in Continuous Casting Process. *Ironmaking and Steelmaking* 3(22): 246–255
19. Tutarova VD, Safonov DS, Shapovalov AN (2012) Density distribution of the spray from flat spray nozzles in the secondary-cooling zone of a continuous caster. *Metallurgist* 56(5-6): 438–442
20. Weizhong DA (1997) Generalized Peaceman–Rachford ADI Scheme for Solving Two-Dimensional Parabolic Differential Equations. *Journal of Scientific Computing* 12: C. 353–360
21. Logunova OS (2009) Программное обеспечение для интерактивного проектирования и оценки работы зон вторичного охлаждения МНЛЗ. *Bull South-Ural State Univ Computer Technologies, Automatic Control & Radioelectronics Ser* 9:20–23
22. Logunova OS (2008) Internal-defect formation and the thermal state of continuous-cast billet. *Steel in Translation* 38(10): 849–852
23. Logunova OS, Matsko II, Posohov IA, Luk'ynov SI (2014) Automatic system for intelligent support of continuous cast billet production control processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 74(9): 1407–1418.
24. Бойл Р. Повышение качества слэба и производительности УНРС на основе ревизии системы вторичного охлаждения // *Новости черной металлургии за рубежом*. 2006. №5. С. 35–38.
25. Куисонг С., Гуангуанг Ю., Жиюан Ж. Изучение связи между условиями охлаждения по ширине слэба и осевой ликвацией // *Новости черной металлургии за рубежом*. 2010. №4. С. 40–42.
26. Карташов Л.П., Зубкова Т.М. Параметрический и структурный синтез технологических объектов на основе системного подхода и математического моделирования. Екатеринбург: УрО РАН, 2009.
27. Решения в области непрерывного литья плоских заготовок: сайт компании Siemens VAI. – 2008 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.industry.siemens.com/datapool/industry/industriesolutions/metals/simetal/ru/Continuous-Slab-Casting-Solutions-ru.pdf> (дата обращения: 10.08.2014).
28. Логунова О.С. Программное обеспечение исследования новых конструкций зон вторичного охлаждения // *Программные продукты и системы*. 2008. №3. С. 76–79.
29. Борисов В.Т. Теория двухфазной зоны металлического слитка. М.: Металлургия, 1987.
30. Борисов В.Т., Колядина Н.Ю., Матвеев Ю.З. Метод определения проницаемости двухфазной зоны затвердевающего сплава // *Заводская лаборатория*. 1980. №10. С. 911–915.
31. Тутарова В.Д., Шаповалов А.Н., Сафонов Д.С. Экспериментальные исследования температуры поверхности непрерывнолитой слэбовой заготовки // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 2012. №3. С. 40–42.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

AUTOMATION OF THE DESIGN OF SECONDARY COOLING SECTIONS OF THE CONTINUOUS CASTING MACHINE

Safonov Dmitry Sergeevich – Senior software engineer, Compass Plus, Magnitogorsk, Russia. E-mail: dmitry.s.safonov@gmail.com.

Logunova Oksana Sergeevna – D.Sc. (Eng.), Head of the Chair «Computer Engineering and Programming», Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. Phone: 8 (3519) 22-03-17. E-mail: logunova66@mail.ru

Abstract. The paper is devoted to the results of the scientific research around development of the system for computer-aided design of secondary cooling sections of the continuous casting machine. Results of the theoretical analysis showed the existence of sophisticated mathematical models for describing heat state of bodies which are not fully employed for solving design

tasks in metallurgy. The mathematical model of the slab heat state and formalized description of two requirements to temperature profile across the slab surface form the basis of the developed system. The authors propose the optimization problem formulation for the search of set of variable-length vectors with coordinates that define nozzle positions in each nozzle row.

Solving the optimization problem involves iterative search of the optimal solution by solving heat equation with different input conditions. The paper shows the structure of the computer-aided design system for calculating optimal nozzle layout in the secondary cooling sections and describes three main scenarios of interaction between user and system. Analysis of the particular nozzle layout obtained with help of the system is provided. The results show that this layout provides even heat removal across the slab surface. Search of the optimal placement of nozzles in one nozzle row require around 300 iterations of calculations. Calculation of the whole layout takes about 2 hours.

Keywords: computer-aided design, continuous casting machine, desing of secondary cooling sections, optimal nozzle layout.

References

1. Bulanov L.V., Korzun L.G. Mashiny nepreryvnogo litiya zagotovok [Continuous casting machines]. Ural centre of PR and commercial "Marat", Ekaterinburg, 2004.
2. Vdovin K.N., Tochilkin V.V., Yachikov I.M. Nepreryvnaya razlivka stali [Continuous casting of steel]. Magnitogorsk, Magnitogorsk state technical university, 2012.
3. Vdovin K.N., Pozin A.E., Podosyan A.A., Tochilkin V.V. Ingot contact with the broad mold walls in continuous slab-casting machines. *Steel in Translation*, 2012, no 43(7), pp. 452-454.
4. Huang X., Thomas B. Modeling of steel grade transition in continuous slab casting processes. *Metallurgical Transactions B*, no 24(2), pp. 379-393.
5. Berdnikov S.N., Pozin A.E., Podosyan A.A., Berdnikov A.S., Mokhov V.A., Vdovin K.N. (2012) Improving narrow mold walls in continuous slab-casting machines. *Steel in Translation*, 2012, no 42(2), pp. 180-182.
6. Zhou X. Heat transfer during spray water-cooling using steady experiment. University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana-Champaign, 2009.
7. Li C. Thermomechanical Finite-Element Model of Shell Behavior in Continuous Casting of Steel. *Metallurgical and materials transactions*, 2004, no 35B, pp. 57-60.
8. Zhang Q. A Heat Transfer and Solidification Model of Continuous Cast. *Advanced Materials Research*, 2010, pp. 154-155.
9. Horsky J, Raudensky M. Measurement of heat transfer characteristics of secondary cooling in continuous casting, Hradec nad Moravici, 2005, pp. 23-31.
10. Shen H, Hardin R, MacKenzie R et al. Simulation Using Realistic Spray Cooling for the Continuous Casting of Multi-component Steel. *Journal of Materials Science and Technology*, 2002, no. 18, pp. 123-128.
11. Zhang X, Jiang Z, Tieu A et al. Analysis of surface temperature and thermal stress field of slab continuous casting. *Advanced Materials Research*, 2009, pp. 554-559.
12. Tutarova V.D., Logunova O.S. Analysis of the surface temperature of continuously cast ingot beyond the zones of air cooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2002, no. 45(22), pp. 4381-4399.
13. Logunova O.S., Matsko I.I., Safonov D.S. Thermal state simulation of the infinite length body taking into account dynamic boundary conditions of the third kind. *Bull South-Ural State Univ Math Model Program Ser*, 2012, no. 27, pp. 74-85.
14. Nozaki T., Matsuno J., Murata K., Ooi H., Kodama M. A secondary cooling pattern for preventing surface cracks of continuous casting slab. *Trans. Iron Steel Inst. Jpn*, 1978, no. 18(6), pp. 330-338.
15. Boyle R, Frick J. Implementation of modern secondary cooling technology in existing casters. *Materials of the 3rd International conference on Continuous Casting of Steel in Developing Countries*, Beijing, 2004.
16. Boyle R, Frick J. New Secondary Cooling Systems and Practices: Nozzles and Cooling Solutions for Continuous Casting of Steel, Lehler, 2012, pp. 33-44.
17. Hardin R., Liu K., Kapoor A. et. al. Transient Simulation and Dynamic Spray Cooling Control Model for Continuous Steel Casting. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2003, no. 34B, pp. 297-306.
18. El-Bealy M., Leskinen N., Fredriksson H. Simulation of Cooling Conditions in Secondary Cooling Zones in Continuous Casting Process. *Ironmaking and Steelmaking*, 1995, no. 3(22), pp. 246-255.
19. Tutarova V.D., Safonov D.S., Shapovalov A.N. Density distribution of the spray from flat spray nozzles in the secondary-cooling zone of a continuous caster. *Metallurgist*, 2012, no. 56(5-6), pp. 438-442.
20. Weizhong D.A. Generalized Peaceman-Rachford ADI Scheme for Solving Two-Dimensional Parabolic Differential Equations. *Journal of Scientific Computing*, 1997, no. 12, pp. 353-360.
21. Logunova O.S. Programmnoe obespechenie dlya interaktivnogo proektirovaniya i otsenki raboty zon vtorichnogo okhlazhdeniya MNLZ [Software for interactive design and evaluation of the work of zones secondary cooling sections in continuous casting machines]. *Bull South-Ural State Univ Computer Technologies, Automatic Control & Radioelectronics*, 2009, no. 9, pp. 20-23.
22. Logunova O.S. Internal-defect formation and the thermal state of continuous-cast billet. *Steel in Translation*, 2008, no. 38(10), pp. 849-852.
23. Logunova O.S., Matsko I.I., Posohov I.A., Luk'ynov S.I. Automatic system for intelligent support of continuous cast billet production control processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, no. 74(9), pp. 1407 - 1418.
24. Boyle R. Audits of secondary cooling systems in existing casters as a method to enhance product quality and productivity. *News of the iron industry abroad*, 2006, no. 5, pp. 35-38.
25. Kuisong S., Guanguang Y., Jiyuan Z. Study of the relationship between the cooling condition in width and the centerline segregation of the slab. *News of the iron industry abroad*, 2010, no. 4, pp. 40-42.
26. Kartashov L.P., Zubkova T.M. Parametricheskij i strukturnyj sintez tekhnologicheskikh ob'ektov na osnove sistemnogo podhoda i matematicheskogo modelirovaniya [Parametrical and structural synthesis of technological objects on the basis of system approach and mathematical modeling]. UrO RAN, Ekaterinburg, 2009.
27. Resheniya v oblasti nepreryvnogo litiya ploskih zagotovok [Solutions in the field of continuous molding of flat slabs]: - URL: <http://www.industry.siemens.com/datapool/industry/industry/solutions/metals/simetal/ru/Continuous-Slab-Casting-Solutions-ru.pdf>
28. Logunova O.S. Programmnoe obespechenie issledovaniya novykh konstruksij zon vtorichnogo okhlazhdeniya [Software for research of the new constructions or secondary cooling]. *Programmye produkty i sistemy [Software products and systems]*, 2008, no. 3: 76 - 79.
29. Borisov V.T. Teoriya dvukhfaznoi zony metallicheskogo slitka [Theory of a two-phase zone of a metal slab]. Moscow: Metallurgiya [Metallurgy], 1987.
30. Borisov V.T., Kolyadina N.Y., Matveev Y.Z. (1980) Metod opredeleniya pronitsaemosti dvukhfaznoi zony zatverdevayushchego splava [Method of determination of permeability of a two-phase zone in the hardening alloy] *Zavodskaya laboratoriya [Plant laboratory]*, 1980, no. 10, pp. 911 - 915.
31. Tutarova V.D., Shapovalov A.N., Safonov D.S. Eksperimentalnye issledovaniya temperatury poverkhnosti nepreryvnoi slyabovoi zagotovki [Experimental researches of the surface temperature of the continuous casting slab]. *Isvestiya VUSov. Chemaya metallurgiya [News of higher institutions. Iron industry]*, 2012, no. 3, pp. 40-42.

ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И РЫНОК ПРОДУКЦИИ

УДК 658

ВЛИЯНИЕ НАЛОГОВЫХ ФАКТОРОВ НА ОЦЕНКУ СТОИМОСТИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Алферова А.В.

Российский государственный социальный университет, г. Москва, Россия

Аннотация. В статье раскрывается значение и направления учета налоговых факторов в стоимостной оценке металлургических предприятий. Разработана и апробирована схема проведения налогово-оценочной ревизии. Определено её место на этапах работы оценщика. Представлен механизм корректировок итоговой стоимости металлургического предприятия с учетом факторов, связанных с ведением реестра акционеров. Введено в обращение понятие «налоговая инвентаризация при оценке». Описан результат проведения налоговой инвентаризации – определение имущественного состава металлургического комплекса и связанных с ним налоговых рисков, возможностями реализации тех или иных налоговых схем, по которым работает оцениваемое металлургическое предприятие.

Ключевые слова: оценка стоимости бизнеса, налоговые аспекты оценки, инвестиционная стоимость, налоговый аудит, налоговая инвентаризация, налоговая база, налоговые факторы, корректировка стоимости, нормализация налоговой отчетности, структура собственности бизнеса.

Введение

Вопросы учета налоговых аспектов при проведении стоимостной оценки приобретают особую актуальность в связи с событиями, которые происходят сейчас в металлургической отрасли. В практическом плане применение механизмов учета при оценке налоговых факторов, представленных в настоящей статье, позволит разработать меры по уменьшению эрозии налогооблагаемой базы российских металлургических компаний, уменьшить ошибки из-за неучета налоговых факторов при стоимостной оценке [1].

Применение налоговой инвентаризации при стоимостной оценке металлургических предприятий

Для систематизации работы по выявлению налоговых факторов, значимых для стоимостной оценки, предлагается использовать при оценке металлургических предприятий «нало-

говую инвентаризацию». Налоговую инвентаризацию можно определить, как процесс, позволяющий оценщику понять, с каким объектом оценки, с точки зрения налоговой составляющей, значимой при определении стоимости, он имеет дело. Результат проведения налоговой инвентаризации – определение имущественного состава, оцениваемого объекта оценки, и связанных с ним налоговых рисков, возможностями реализации тех или иных налоговых схем, по которым работает оцениваемое предприятие, сформированный по итогам её проведения список недостатков оцениваемого объекта, приводящих к отрицательным стоимостным корректировкам.

Как таковой этап «налоговая инвентаризация» не прописан отдельно и не выделен в классических учебных пособиях по оценке. В связи с этим в соответствии с федеральными стандартами оценки (ФСО), методическими рекомендациями по оценке его следует проводить на стадии работы оценщика «нормализация бухгалтерской отчетности» [2].

Основное назначение и функционал налоговой инвентаризации – определить оцениваемый объект не просто по его названию и функциональному предназначению, а по его налоговой внутренней стоимостной структуре.

Цель налоговой инвентаризации – найти налоговые позиции, напрямую влияющие на стоимость активов организации. Как и при обычной инвентаризации, налоговая инвентаризация предполагает работу с реальными и нематериальными активами, пассивами организации с выявлением налоговых последствий состояния этих элементов инвентаризации.

Анализ налоговых факторов, оказывающих существенное влияние на стоимость металлургических компаний

Выявление в процессе налоговой инвентаризации, налогово-оценочного дьюдилидженса значимых налоговых фактов ведёт оценщика к следующему уровню работ по оценке: определению налоговых факторов, влияющих на стоимость.

Как показывает практика проведения налоговой инвентаризации, на оцениваемом объекте следует обратить внимание на возникновение такой ситуации, когда у оцениваемого объекта могут быть нереализованные права на вычет налога на добавленную стоимость. Это следует учесть при определении инвестиционной стоимости. Последствия для оценки здесь такие, что крупные суммы НДС будут предъявлены к вычету [3,4].

Другой фактор – это переносимые налоговые убытки. На предприятии выявляются суммы налоговых убытков прошлых лет, которые в течение десяти лет вычитаются из налогооблагаемой базы по налогу на прибыль. В результате, при определении инвестиционной стоимости должны быть сделаны поправки на преимущество, которым обладает оцениваемый объект в виде экономии на налоге на прибыль. Это преимущество учитывается если у инвестора есть разветвлённая организационная структура бизнеса, у него в распоряжении имеются разные предприятия, разных форм собственности. Как показало проведенное исследование, разнообразие организационно-правовых форм у крупных российских компаний распространяется даже на частных предпринимателей. Это проявляется в технической регистрации бизнеса на работников компании

при фактическом распоряжении ими крупных структур – владельцев всего бизнеса [5,6].

В расчеты стоимости надо включить экономию на налоге на прибыль при эффективном налоговом администрировании и профессиональном ведении бухгалтерского учета в крупных холдингах, оценивающих и приобретающих новый бизнес полностью.

Последние пункты налоговой инвентаризации касаются расчетов с бюджетом. Проведённое исследование показывает, что у оцениваемых крупных, средних компаний и малых предприятий существует переплата по многим налогам. Менеджеры предприятий в 9 исследованных случаях из 10 не знали об этом, такие факты выявляются в процессе аудиторской проверки более квалифицированными специалистами аудиторских компаний. Это ещё раз подтверждает необходимость оценки бизнеса при взаимодействии с аудиторами и одновременной аудиторской проверке и проведении налогового дьюдилидженса.

В этом случае инвестиционная стоимость должна быть скорректирована с учетом реализации будущих прибылей от экономии на налоговых выплатах за счет произошедшей и выявленной переплаты налогов, уточнением состояния расчетов с бюджетом [7].

Налоговая инвентаризация расчетов и затрат выявляет накопленные затраты, еще не ставшие налоговым расходом – другой существенный налоговый фактор, который необходимо учесть при оценке бизнеса. Это затраты по инвестициям в основные средства, которые отражены на счете 08 «Вложения во внеоборотные активы». После завершения этих капитальных вложений инвестором он получает огромный потенциал по использованию амортизации по этим основным средствам, которые будут введены в строй, в виде затрат в налоговых расчетах по налогу на прибыль.

Проведённые в рамках исследования расчеты, учитывающие влияние налоговых факторов на стоимость металлургических компаний, сведены в **таблицу**. Влияние каждого фактора было оценено в рамках каждого из трёх подходов оценки: доходного, сравнительного и затратного. На основе расчетов стоимости нескольких объектов оценки из разных отраслей были определены диапазоны колебаний стоимости в зависимости от действия каждого из факторов.

**Влияние налоговых факторов на стоимость металлургических предприятия
при разных подходах к оценке**

№ п/п	Изучаемый налоговый фактор	Установленный диапазон воздействия при применении доходного подхода	Установленный диапазон воздействия при применении сравнительного подхода	Установленный диапазон воздействия при применении затратного подхода
1	Вычеты по НДС	Увеличение на 3,5–5,5%	Увеличение до 12%	Сложно устанавливается из-за отсутствия сопоставимых предприятий аналогов
2	Переносимые налоговые убытки – уменьшение базы по налогу на прибыль	До 11% в прогнозный период	До 18,5% при применении метода чистых активов	Сложно сделать заключение, так как эффект проявляется в исследуемый момент времени
3	Переплата налогов	В зависимости от налогов	В зависимости от налогов	Сложно сделать заключение, так как эффект проявляется в исследуемый момент времени
4	Накопленные затраты, еще не ставшие налоговым расходом	В зависимости от характера деятельности предприятия и доли инвестиционных расходов в общем бюджете оцениваемого предприятия	В зависимости от характера деятельности предприятия и доли инвестиционных расходов в общем бюджете оцениваемого предприятия	До 25–30%

Заключение

Налоговые факторы не получали подробного и детального освещения в работе российских оценщиков при оценке стоимости металлургических компаний. В настоящей статье они были отдельно выделены, определены и систематизированы. Для корректного определения стоимости важна разработанная и апробированная схема проведения налогово-оценочной ревизии (дью-дилиденса), предложен механизм её проведения и дан диапазон влияния налоговых факторов на основании изученной выборки металлургических компаний России.

Список литературы

1. Российская газета. Официальный сайт. URL: <http://www.rg.ru/2013/12/12/poslanie.html> (дата обращения: 10.01.2015).
2. Дамодаран А. Инвестиционная оценка: Инструменты и методы оценки любых активов / Асват Дамодаран; пер. с англ. 8-е изд. М.: Альпина Бизнес Букс, 2014. 1316 с.
3. Эскиндаров М. А. Оценка стоимости бизнеса (для бакалавров): учебник. М.: Кнорус, 2015. 320 с.
4. Оценка стоимости предприятия (бизнеса) / А.Г. Грязнова, М.А. Федотова, М.А. Эскиндаров, Т.В. Ташихина, Е.Н. Иванова, О.Н. Щербакова. М.: ИНТЕРРЕКЛАМА, 2003. 544 с.
5. Валдайцев С.В. Оценка бизнеса: учебник. 2-е изд. М.: ТК Велби: Изд-во Проспект, 2004.
6. Богатырев С.Ю. Исследование влияния человеческого и интеллектуального капитала на рост российских инновационных компаний // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. № 3. С. 98–101.
7. Гафарова Г.Р. Ценообразование в системе налогового права // Налоги. 2013. № 4. С. 10–12.

THE IMPACT OF TAX FACTORS ON A VALUATION OF METALLURGICAL ENTERPRISES

Alferova Anna Viktorovna – Postgraduate Student, Russian State Social University, Moscow, Russia.

Abstract. The article explains the meaning of, and guidelines for tax accounting factors in the valuation of metallurgical enterprises. A scheme of a tax and evaluation audit was developed and tested. Its place at working stages of an appraiser was determined. This paper contains a mechanism of adjustment of the final value of metallurgical enterprises, taking into account factors related to maintenance of the register of shareholders. The term "tax inventory in the assessment" is introduced. The article also describes the results of the tax inventory: determination of property of the metallurgical complex and related tax risks, opportunities for the implementation of these or other tax schemes, which are used by an appraised metallurgical enterprise.

Keywords: business valuation, tax aspects of valuation, investment value, tax audit, tax inventory, tax base, tax factors, value adjustment, normalization of tax reporting, ownership structure of the business.

References

1. The Russian newspaper. Official site. URL: <http://www.rg.ru/2013/12/12/poslanie.html> (last accessed date: 01/10/2015)
2. Damodaran A. Investment valuation: Tools and techniques for determining the value of any asset. Trans. from English. 8th ed. Moscow: Alpina Business Books, 2014, 1316 p.
3. Eskindarov M.A. *Otsenka stoimosti biznesa (dlya bakalavrov): uchebnik* [Business Valuation (for bachelors). Textbook]. Moscow: KnoRus, 2015, 320 p.
4. Gryaznova A.G., Fedotova M.A., Eskindarov M.A., Tazikhina T.V., Ivanova E.N., Shcherbakova O.N. *Otsenka stoimosti predpriyatiya (biznesa)* [Enterprise (business) valuation]. Moscow: INTERREKLAMA, 2003, 544 p.
5. Valdaytsev S.V. *Otsenka biznesa: uchebnik* [Business valuation]. Textbook. 2nd ed., Moscow: TK Velbi, Prospect, 2004.
6. Bogatyrev S.Yu. Investigation of the influence of human and intellectual capital on a growth of Russian innovative companies. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2013, no. 3, pp. 98-101.
7. Gafarova G.R. Pricing in tax law. *Taxes*, 2013, no. 4, pp. 10-12.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Абдукамилов Шавкат Шухратович – канд. техн. наук, ассистент кафедры «Строительная механика», Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта, Узбекистан. E-mail: abdukamilov@mail.ru.

Алферова Анна Викторовна – аспирантка кафедры «Финансы и кредит» Российского государственного социального университета, г. Москва, Россия.

Барышников Михаил Павлович – канд. техн. наук, проф. кафедры машиностроительных и металлургических технологий, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». E-mail: arcsmag@mail.ru.

Бурнашев Руслан Эрикович – аспирант ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия. E-mail: bre@uralomega.ru.

Бушуев Антон Николаевич – ст. преп. кафедры теплоэнергетики и теплотехники Орского гуманитарно-технологического института (филиала) ВПО «Оренбургский государственный университет», Россия. Тел.: 8(3537)23-81-98. E-mail: nielsen1@mail.ru.

Василец Владимир Николаевич – главный инженер Разрезоуправления ОАО «Суэж-Кузбасс», г. Киселевск, Россия. Тел.: 8 (38464) 26420. E-mail: VasilezVN@suek.ru.

Видин Юрий Владимирович – канд. техн. наук, проф. кафедры ТТи ГГД Политехнического института Сибирского федерального университета, г. Красноярск, Россия.

Вяткин Герман Платонович – член-корреспондент РАН, д-р хим. наук, президент ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ), г. Челябинск, Россия. Тел. 8 (351) 265-43-21.

Габдрахимов Мавлитзян Сагитьянович – д-р техн. наук, проф. кафедры «Нефтепромысловые машины и оборудование», ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», филиал, г. Октябрьский, Россия.

Голев Алексей Дмитриевич – студент, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия.

Голубчик Эдуард Михайлович – канд. техн. наук, доц. кафедры машиностроительных и металлургических технологий, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия. E-mail: golub66@mail.ru.

Гребенникова Вера Владимировна – ст. преп. кафедры автоматизированных систем управления, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия. Тел.: (3519)29-85-58. E-mail: greb1981@mail.ru.

Гун Геннадий Семенович – д-р техн. наук, советник ректора, профессор кафедры машиностроительных и металлургических технологий, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия. Тел.: (3519) 29-85-26. E-mail: mgtnu@magtu.ru.

Дабала Мануэле – профессор департамента индустриальной инженерии Университета г. Падуи, Италия.

Дерябин Юрий Андреевич – д-р техн. наук, начальник сталеплавильного отдела ОАО «УРАЛГИПРОМЕЗ», г. Екатеринбург, Россия. E-mail: info@uralgipromez.ru.

Джигоева Ада Константиновна – канд. техн. наук, доц. кафедры безопасности жизнедеятельности, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (ГТУ), г. Владикавказ, Россия. E-mail: adadak@mail.ru.

Довголюк Людмила Васильевна – инженер, ОАО «Уральский институт металлов», г. Екатеринбург, Россия. Тел.: (343)374-03-91. E-mail: uim@ural.ru.

Ефимова Юлия Юрьевна – канд. техн. наук, доц. кафедры машиностроительных и металлургических технологий, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия.

Звонов Сергей Николаевич – канд. техн. наук, директор ООО «КСЕНА», г. Пермь, Россия. Тел.: 8 (342) 218-21-95. E-mail: info@kcena.ru.

Зиянгиров Артур Рамилевич – аспирант кафедры «Нефтегазопромысловое оборудование», ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Россия. E-mail: ZiyangirovAR@gmail.com.

Ишимов Алексей Сергеевич – аспирант ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». E-mail: TTSoprapo.A@gmail.com.

Казаков Роман Владимирович – канд. техн. наук, доцент кафедры ТТиГГД Политехнического института Сибирского федерального университета, г. Красноярск, Россия. E-mail: roman.kazakov@list.ru.

Карманов Вадим Владимирович – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Инновационные технологии машиностроения», ФГБОУ ВПО Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Россия. Тел.: (342)2391508. E-mail: karmanovs@yandex.ru.

Картавцев Сергей Владимирович – д-р техн. наук, проф. кафедры теплотехнических и энергетических систем, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия. E-mail: kartavzw@mail.ru.

Клочковский Станислав Павлович – канд. хим. наук., г. Магнитогорск, Россия. Тел.: (3519)-42-31-11. E-mail: klochkovskiysp37@mail.ru.

Константинов Дмитрий Вячеславович – аспирант ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия. E-mail: const_dimon@mail.ru.

Копцева Наталья Васильевна – д-р техн. наук, проф. кафедры литейного производства и материаловедения, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия.

Корнилов Сергей Николаевич – д-р техн. наук, доц., зав. кафедрой «Промышленный транспорт», ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия. E-mail: kornilov_sn@mail.ru.

Корчунов Алексей Георгиевич – д-р техн. наук, проф., проректор по международной деятельности, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия. Тел.: 8 (3519) 29-84-09. E-mail: international@magtu.ru.

Кулагин Алексей Юрьевич – канд. техн. наук, зам. начальника цеха парогазовоздухоснабжения ОАО «Орскнефтеоргсинтез», Россия. Тел.: 8(3537)34-22-71. E-mail: aukulagin@mail.ru.

Курбаков Иван Андреевич – студент, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия.

Лапаев Василий Николаевич – канд. техн. наук, технический консультант ООО «НТЦ-Геотехнология», г. Челябинск, Россия. E-mail: lapaev@ustup.ru.

Логунова Оксана Сергеевна – д-р техн. наук, зав. кафедрой вычислительной техники и программирования, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия. Тел.: 8 (3519) 22-03-17. E-mail: logunova66@mail.ru.

Лонзингер Петр Владимирович – аспирант кафедры «Системы электроснабжения», ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ), г. Челябинск, Россия. E-mail: lpw91@mail.ru.

Морозов Сергей Иванович – канд. физ.-мат. наук, доц. кафедры «Общая и теоретическая физика», ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ), г. Челябинск, Россия. E-mail: morozov72@gmail.com.

Некит Владимир Афанасьевич – канд. техн. наук, доц. кафедры машин и технологий обработки давлением, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия. Тел.: (3519) 29-84-36. E-mail: Vladbmir@Nekit.info.

Нуртдинов Антон Сергеевич – аспирант, зав. лабораторией кафедры «Инновационные технологии машиностроения», ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Россия. Тел.: (342) 2391508. E-mail: anton.nurtdinov@gmail.com.

Панжин Андрей Алексеевич – канд. техн. наук, ученый секретарь, Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия. Тел. (343)350-44-76. E-mail: panzhin@igduran.ru.

Пикалов Вячеслав Анатольевич – д-р техн. наук, начальник отдела ООО «НТЦ-Геотехнология», г. Челябинск, Россия. E-mail: pikalov@ustup.ru.

Платов Сергей Иосифович – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой машин и технологий обработки давлением, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия. Тел. (3519) 29-84-92. E-mail: psipsi@mail.ru.

Полякова Марина Андреевна – канд. техн. наук, доц. кафедры машиностроительных и металлургических технологий, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия. E-mail: m.polyakova-64@mail.ru.

Портнова Ирина Васильевна – инженер кафедры вычислительной техники и программирования, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия. Тел.: 8(3519)29-85-63.

Рубин Геннадий Шмульевич – канд. техн. наук, доц. кафедры технологии, сертификации и сервиса автомобилей, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный тех-

нический университет им. Г.И. Носова», Россия. E-mail: rubingsh@gmail.com.

Рябчиков Михаил Юрьевич – канд. техн. наук, доц. кафедры автоматизированных систем управления, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия. Тел. (3519)29-85-58. E-mail: mr_mgn@mail.ru.

Рябчикова Елена Сергеевна – ст. преп. кафедры автоматизированных систем управления, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия. Тел. (3519)29-85-58. E-mail: mika.elena@mail.ru.

Савченко Илья Андреевич – аспирант кафедры физической химии и химической технологии, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия. E-mail: savchenkoilya@mail.ru.

Сафонов Валерий Иванович – канд. физ.-мат. наук, доц. кафедры «Системы электроснабжения», ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ), г. Челябинск, Россия. E-mail: val-iv-s@yandex.ru.

Сафонов Дмитрий Сергеевич – старший инженер-программист, ООО «Компас Плюс», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: dmitry.s.safonov@gmail.com

Смирнов Андрей Леонидович – старший инженер, ОАО «Уральский институт металлов», г. Екатеринбург, Россия. Тел.: (343)374-03-91. E-mail: uim@ural.ru.

Смирнов Андрей Николаевич – д-р физ.-мат. наук, зав. кафедрой физической химии и химической технологии, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия. Тел.: (3519)29-85-78. E-mail: sman@magtu.ru.

Смирнов Леонид Андреевич – академик РАН, д-р техн. наук, профессор, научный руководитель ОАО «Уральский институт металлов», г. Екатеринбург, Россия.

Тезиев Таймураз Муратович – канд. техн. наук, доц. кафедры горного дела, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (ГТУ), г. Владикавказ, Россия. E-mail: tteziev@yandex.ru.

Трофимов Виктор Николаевич – д-р техн. наук, проф. кафедры «Динамика и прочность машин», ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Россия. Тел.: 8 (342)239-13-49. E-mail: tvn_perm@pstu.ru.

Хохлов Юрий Иванович – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Системы электроснабжения», ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ), г. Челябинск, Россия. E-mail: Khokhlov@energo.susu.ac.ru.

Чукин Дмитрий Михайлович – аспирант ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия.

Чукин Михаил Витальевич – д-р техн. наук, проф., первый проректор – проректор по научной и инновационной работе ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Тел.: (3519)29-85-26. E-mail: chukin@magtu.ru.

Шульмин Дмитрий Сергеевич – аспирант, младший научный сотрудник, ОАО «Уральский институт металлов», г. Екатеринбург, Россия.

Ячиков Игорь Михайлович – д-р техн. наук, проф. кафедры вычислительной техники и программирования, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия. Тел.: 8(3519)29-85-63. E-mail: jachikov@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»).