

ВЕСТНИК

Магнитогорского государственного технического
университета им. Г.И. Носова

2016. Т.14, №4

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

Издается с марта 2003 года

Редакционный совет

Председатель редсовета:

Колокольцев В.М. – ректор
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,
проф., д-р техн. наук, Магнитогорск, Россия.

Члены редсовета:

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

Дабала М. – профессор, Факультет промышленного
инжиниринга Университета г. Падуа, Италия;

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

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

Кавалла Р. – профессор, директор института обработки металлов
давлением, Фрайбергская горная академия, Фрайберг, Германия;

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

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

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

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

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

Счастливец В.М. – зав. лабораторией ИФМ
УрО РАН; академик РАН, д-р техн. наук,
Екатеринбург, Россия.

Главный редактор:

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

Первый зам. главного редактора:

Гун Г.С. – проф., д-р техн. наук,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,
Магнитогорск, Россия.

Зам. главного редактора:

Гавришев С.Е. – проф., д-р техн. наук
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,
Магнитогорск, Россия;

Корчунов А.Г. – проф., д-р техн. наук,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,
Магнитогорск, Россия;

Логунова О.С. – проф., д-р техн. наук,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,
Магнитогорск, Россия;

Храмшин В.Р. – доц., д-р техн. наук,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,
Магнитогорск, Россия.

Ответственные секретари:

Полякова М.А. – доц., канд. техн. наук
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,
Магнитогорск, Россия;

Шубина М.В. – доц., канд. техн. наук
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,
Магнитогорск, Россия.

Редактор: Кутекина Н.В.

Технический редактор: Гаврусева К.В.

Перевод на английский: Елесина В.И.

© ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2016

Подписной индекс издания 48603 в объединенном каталоге «Пресса России», том 1.

Также подписку в оперативном режиме можно оформить и оплатить в удобной для Вас форме на подписной страничке сайта Агентства «Книга-Сервис» по ссылке:

код html: <http://www.akc.ru/itm/vestnik-magnitogorskogo-gosudarstvennogo-tehnicheskogo-universiteta-im-gi-nosova/>

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

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

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

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

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

Адрес редакции:

455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38

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

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

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

Журнал подготовлен к печати издательским центром

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

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

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

Выход в свет 26.12.2016. Заказ 645. Тираж 500 экз. Цена свободная.

VESTNIK

of Nosov Magnitogorsk State Technical University

2016. Vol. 14, no. 4

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

PUBLISHED SINCE MARCH, 2003

Editorial Board Members

Chairman:

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

Honorary Board Members:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Editor-in-Chief:

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

First Deputy Editor-in-Chief:

Gun G.S. – D.Sc., Prof.,
Nosov Magnitogorsk State Technical University,
Magnitogorsk, Russia.

Deputy Editor-in-Chief:

Gavrishev S.E. – D.Sc., Prof., Nosov Magnitogorsk
State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Korchunov A.G. – D.Sc., Prof.,
Nosov Magnitogorsk State Technical University,
Magnitogorsk, Russia.

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

Khramshin V.R. – D.Sc., Assoc. Prof.,
Nosov Magnitogorsk State Technical University,
Magnitogorsk, Russia.

Executive Editors:

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

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

Editor:

Kutekina N.V.

Technical Editor:

Gavruseva K.V.

Translated into English:

Elesina V.I.

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

Registration certificate PI # FS 77-59632 dated October 10, 2014 is issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media.

Founder – Nosov Magnitogorsk State Technical University
(38, pr. Lenina, Magnitogorsk 455000, Chelyabinsk Region)

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

Editorial office:

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

Prepared for the publication by the NMSTU publishing center,

38, pr. Lenina, city of Magnitogorsk 455000, Russia

Printed by the NMSTU printing section,

38, pr. Lenina, city of Magnitogorsk 455000, Russia.

Publication date: 26.12.2016. Order 645. Circulation: 500. Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

Разработка полезных ископаемых	5
<i>Свиридова Т.В., Боброва О.Б., Волкова Е.А., Перятинский А.Ю., Сомова Ю.В.</i>	
Обеспечение устойчивости откосов бортов карьеров с целью предупреждения аварий и чрезвычайных ситуаций	5
Литейное производство	11
<i>Гаманюк С.Б., Руцкий Д.В., Зюбан Н.А., Чубуков М.Ю., Пузиков А.Я.</i>	
Влияние геометрии слитка и условий затвердевания головной части на процессы структурообразования и развитие внутренних дефектов	11
<i>Усков И.В., Гильманишина Т.Р., Беляев С.В., Богданова Т.А., Усков Д.И., Партыко Е.Г.</i>	
Исследование влияния содержания графита на качество соляных стержней	20
<i>Ольховик Е.О., Десницкий В.В.</i>	
Применение методов топологической оптимизации при разработке литейной технологии	27
<i>Илларионов И.Е., Стрельников И.А.</i>	
О применении техногенных отходов в литейном производстве	36
Обработка металлов давлением	42
<i>Ерисов Я.А., Гречников Ф.В., Сурудин С.В.</i>	
Критерий пластичности анизотропной среды с учетом кристаллографии структуры и его экспериментальная проверка	42
<i>Загиров Н.Н., Логинов Ю.Н., Иванов Е.В.</i>	
Рециклинг кусочных отходов медной проволоки в исходную длинномерную продукцию методами обработки давлением	50
<i>Некрасов И.И., Карамышев А.П., Паршин В.С., Федулов А.А., Дронов А.И., Хорев В.А.</i>	
Исследование влияния условий трения на энергосиловые параметры процесса наружной высадки концов труб	57
<i>Курмачев Ю.Ф.</i>	
Профиль холостой зоны калибра станов холодной прокатки труб	61
<i>Усанов М.Ю., Харитонов В.А.</i>	
Эффективность применения деформации кручения в способах производства наноструктурированной проволоки	66
Материаловедение и термическая обработка металлов	72
<i>Чукин М.В., Полецков П.П., Набатчиков Д.Г., Гущина М.С., Алексеев Д.Ю., Хакимуллин К.</i>	
Математические зависимости механических свойств от химического состава и режимов термической обработки высокопрочного листового проката	72

CONTENTS

Mining	5
<i>Sviridova T.V., Bobrova O.B., Volkova E.A., Peryatinsky A.Yu., Somova Yu.V.</i>	
Ensuring the stability of pit slopes in order to prevent accidents and emergencies.	5
Metal Casting	11
<i>Gamanyuk S.B., Rutsikii D.V., Zyuban N.A., Chubukov M.Yu. Puzikov A.Ja.</i>	
The effect of ingot geometry and ingot top solidification conditions on solidification and the development of internal defects	11
<i>Uskov I.V., Gil'manshina T.R., Belyaev S.V., Bogdanova T.A., Uskov D.I., Partyko E.G.</i>	
Studying the effect of graphite concentration on the quality of salt cores	20
<i>Ol'khovik E.O., Desnitskii V.V.</i>	
Topological optimization in the development of casting processes	27
<i>Illarionov I.E., Strelnikov I.A.</i>	
On the application of industrial waste in foundry industry	36
Metal Forming	42
<i>Erisov Ya.A., Grechnikov F.V., Surudin S.V.</i>	
Anisotropic medium yield function allowing for the crystallographic structure and its experimental verification	42
<i>Zagirov N.N., Loginov Yu.N., Ivanov E.V.</i>	
Recycling of copper wire scrap into initial long products by metal forming	50
<i>Nekrasov I., Karamyshev A., Parshin V., Fedulov A., Dronov A., Khorev V.</i>	
Looking at the relationship between the friction conditions and the energy and force of the external upset end process	57
<i>Kurmachev Yu.F.</i>	
Gauge idle zone profile in cold rolling pipe mills	61
<i>Usanov M.Yu., Kharitonov V.A.</i>	
The effectiveness of deformation torsion for the manufacture of ufg structured carbon wire	66
Materials Science and Heat Treatment	72
<i>Chukin M.V., Poletskov P.P., Nabatchikov D.G., Gushchina M.S., Alekseev D.Yu., Khakimullin K.</i>	
Mathematical dependences between the mechanical properties of high-strength rolled sheet steel and its chemical composition and heat treatment conditions	72

Стандартизация, сертификация и управление качеством	76
<i>Рубин Г.Ш., Голубчик Э.М., Лукьянова К.С., Дья Х., Стебляно В.Л.</i>	
Фрактальность структур как инструмент управления показателями качества металлопродукции	76
Энергетика металлургии, энергосбережение и электротехнические комплексы	85
<i>Рябчикова Е.С., Рябчиков М.Ю., Парсункин Б.Н.</i>	
Экспериментальное определение параметров воздействия электродинамических сил дуги переменного тока на сталь в ДСП-180 ОАО «ММК»	85
<i>Николаев А.А., Корнилов Г.П., Храмишин Т.Р., Никифоров Г., Муталлапова Ф.Ф.</i>	
Экспериментальные исследования электромагнитной совместимости современных электроприводов в системе электроснабжения металлургического предприятия	96
Стратегия развития, подготовка и обучение специалистов	106
<i>Тулупов О.Н., Моллер А.Б., Наливайко А.В., Райес М.С., Гуэрра Х.А.</i>	
Управление качеством при модернизации оборудования и процессов (сталь-сортовой прокат) на основе повышения квалификации кадров в рамках российско-кубинского сотрудничества	106
Сведения об авторах	115

Standardization, Certification and Quality Management	76
<i>Rubin G.Sh., Golubchik E.M., Lukianova K.S., Dyja H., Steblyanko V.L.</i>	
Fractal structures as a steel product quality management tool	76
Power Engineering in Metallurgy, Energy Saving and Electrotechnical Systems	85
<i>Ryabchikova E.S., Ryabchikov M.Yu., Parsunkin B.N.</i>	
Experimental analysis of the impact produced by ac arc electrodynamic force on steel in EAF-180 of MMK OJSC	85
<i>Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Khramshin T.R., Nikiforov G., Mutallapova F.F.</i>	
Experimental study of electromagnetic compatibility of modern electric drives used in the power supply system of a metallurgical enterprise	96
Development Strategy and Specialist Training	106
<i>Tulupov O.N., Moller A.B., Nalivayko A.V., Reyes M.S., Guerra J.A.</i>	
Quality management and revamping in steel and long product industries realised through personnel training within a russian-cuban partnership	106
Information about authors	115

РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.271.333

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-4-5-10

ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ БОРТОВ КАРЬЕРОВ С ЦЕЛЮ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ АВАРИЙ И ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

Свиридова Т.В., Боброва О.Б., Волкова Е.А., Перятинский А.Ю., Сомова Ю.В.

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

Аннотация

Постановка задачи (актуальность работы): в статье предложена методика расчета устойчивости откосов с учетом объемно-напряженного состояния пород с целью предотвращения аварий и чрезвычайных ситуаций на горных предприятиях. Горнодобывающая отрасль отличается большим количеством опасных и вредных производственных факторов, угрожающих жизни и здоровью горных рабочих. Насыщенность рабочего пространства устройствами, машинами и механизмами, возможность появления опасных газов, пожаров и обрушений горных пород – все это значительно осложняют трудовой процесс работников горных предприятий. Каждая четвертая авария на горных предприятиях – обрушение горных пород. В шахтах особую опасность представляют участки выработок, на которых возможны обрушения вследствие неправильно выбранных параметров горных работ, а при эксплуатации карьеров значительную опасность создают оползни и обрушения уступов и бортов карьеров. Причинами возникновения оползней на карьерах являются недостаточная обоснованность параметров откосов бортов карьеров и отвалов; несоблюдение проектных параметров; нарушение параметров технологического процесса. **Цель работы:** совершенствование системы предупреждения ЧС на стадии проектирования для снижения количества обрушений и оползней на горных предприятиях. **Новизна:** существующие инженерные методики ВНИМИ, которые широко используются при проектировании открытой и комбинированной разработки месторождений, не учитывают напряженно-деформированное состояние массива и, следовательно, не позволяют обоснованно выбирать оптимальные параметры погашения откосов бортов. Расчеты устойчивости ведутся по круглоцилиндрической или прямолинейной линии скольжения. Однако практика показывает, что деформации бортов карьеров представляют собой сферическую поверхность. **Результат:** в предложенной методике расчета объемного коэффициента запаса устойчивости откоса использовано суммирование удерживающих и сдвигающих сил с учетом изменчивости их направлений по сферической поверхности скольжения. **Практическая значимость:** совершенствование системы предупреждения ЧС на стадии проектирования для снижения количества обрушений и оползней на горных предприятиях. В статье также проведен анализ существующих методов расчетов устойчивости откосов бортов карьеров.

Ключевые слова: авария, чрезвычайная ситуация, карьер, оползень, коэффициент запаса устойчивости, поверхность скольжения.

Введение

Предприятия горнодобывающей отрасли отличаются большим количеством опасных и вредных производственных факторов, угрожающих жизни и здоровью горных рабочих.

В первую очередь это насыщенность рабочего пространства устройствами, машинами и механизмами, во вторых – возможность появления опасных газов, пожаров и, конечно же, обрушений горных пород. Все это значительно осложняет трудовой процесс работников горных предприятий.

© Свиридова Т.В., Боброва О.Б., Волкова Е.А., Перятинский А.Ю., Сомова Ю.В., 2016

Теория, материалы и методы исследования, технические и технологические разработки

Основными предпосылками возникновения чрезвычайных ситуаций (ЧС) на горных предприятиях являются:

- высокая эксплуатационная нагрузка на технические устройства, используемые в технологическом процессе;
- высокий уровень износа основных и производственных фондов и систем защиты;
- нарушение технологической дисциплины при разработке пластов угля, склонных к самовозгоранию;

• сложные горно-геологические условия при добыче полезных ископаемых, выраженные тектоническими нарушениями;

• недостаточный контроль за ранними стадиями возникновения эндогенных пожаров [1].

Так, анализ деятельности Военизированной горноспасательной части МЧС России (ВГСЧ МЧС России) за период 2009–2014 годов показывает, что подразделениями ликвидировано 265 аварий. Из них подземных пожаров – 50, пожаров на поверхности обслуживаемых объектов – 35, взрывов и вспышек метана – 25, обрушений горной массы – 61, прочих аварий – 94 (рис. 1–3) [1].

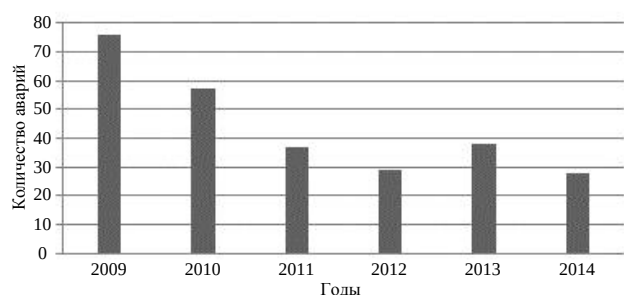


Рис. 1. Аварии, ликвидированные подразделениями ВГСЧ МЧС России за период 2009–2014 годы

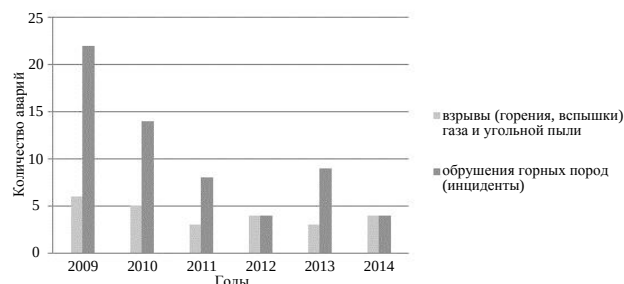


Рис. 2. Взрывы и обрушения, ликвидированные подразделениями ВГСЧ МЧС России за период 2009–2014 годы

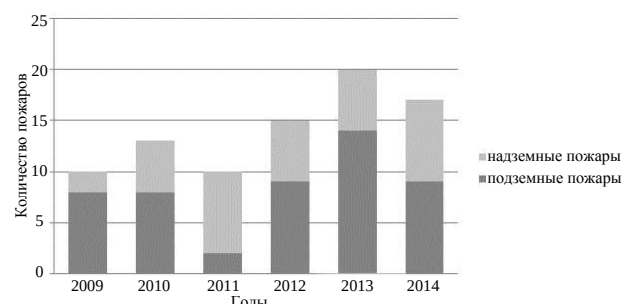


Рис. 3. Пожары, ликвидированные подразделениями ВГСЧ МЧС России за период 2009–2014 годы

В настоящее время подразделениями ВГСЧ обслуживается 998 опасных производственных объектов, в том числе: 100 угольных шахт (из них к

опасным по газу относятся 90 шахт), 82 подземных объекта по добыче полезных ископаемых, 370 объектов по добыче полезных ископаемых открытым способом, 70 объектов строительства подземных сооружений, 122 предприятия по переработке и обогащению полезных ископаемых и 254 прочих опасных производственных объектов (рис. 4) [1].

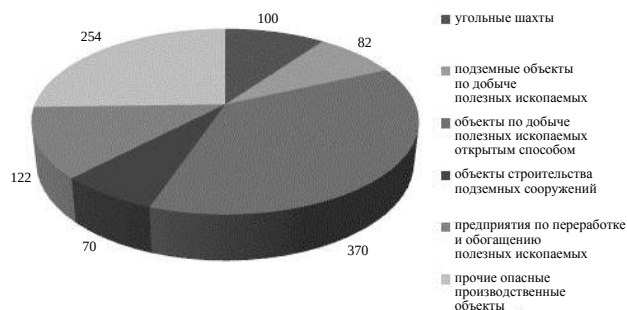


Рис. 4. Объекты, обслуживаемые подразделениями ВГСЧ МЧС России

Из проведенного анализа следует, что каждая 4-я авария на горных предприятиях – обрушение горных пород. Основную долю опасных производственных объектов составляют предприятия по добыче полезных ископаемых открытым и подземным способом.

В шахтах особую опасность представляют участки выработок, на которых возможны обрушения вследствие неправильно выбранных параметров горных работ, а при эксплуатации карьеров значительную опасность создают оползни и обрушения уступов и бортов карьеров.

Так, за последние 30 лет произошло большое количество катастрофических оползней при добыче полезных ископаемых открытым способом (см. таблицу) [2].

Оползни открытых горных выработок и отвалов

Год	Местоположение	Объем сошедшей породы, млн м ³
1985	Внешний отвал буроугольного карьера «Меркур», тер.бывш. ЧССР	120–140
1987	Борт карьера №3 Прикаспийского ГМК, бывш. СССР	25
1990	Внешний отвал буроугольного карьера «Иржи», тер.бывш. ЧССР	50–70
1992	Внешний отвал Норильского ГМК, Россия	60
2000	Нерабочий борт карьера «Лучегорский-2», Россия	1,5
2002	Борт карьера Кумтор, Кыргызстан	2,7
2003	Внутренний отвал разреза «Павловский-2», Россия	1,7
2004	Борт буроугольного разреза «Уртуйский», Россия	1,0
2005	Внутренний отвал разреза «Северная депрессия», Россия	3

Причинами возникновения оползней на карьерах являются недостаточная обоснованность параметров откосов бортов карьеров и отвалов; несоблюдение проектных параметров; нарушение параметров технологического процесса.

Таким образом, для снижения количества обрушений и оползней на горных предприятиях необходимо в первую очередь совершенствование системы предупреждения ЧС именно на стадии проектирования.

При проектировании параметров бортов карьеров, с одной стороны, необходимо обосновать угол откоса, который позволит сократить объем вскрышных пород, а с другой стороны, он должен соответствовать требованиям устойчивости.

В практике проектирования карьеров применяются различные методы расчета устойчивости бортов карьеров.

Анализ существующих методов и схем расчета, которыми пользуются проектные организации, позволил выявить их достоинства и недостатки, а также определить условия их применения [3, 13].

Так, метод В.В. Соколовского – Ю.Н. Малюшицкого дает удовлетворительные результаты при высоте откосов от 30 до 80 м, при средних значениях сцепления пород до 10 т/м^2 и средних значениях угла внутреннего трения более 5 град, при незначительных колебаниях величин объемного веса пород. Данный метод не учитывает естественные поверхности ослабления. Поэтому при наличии в толще пород слабых контактов и различных нарушений следует производить проверочные расчеты другими методами. Метод Соколовского-Малюшицкого дает более пологие углы, чем метод ВНИМИ.

Наиболее пологий угол получается при расчете по методу Н.Н. Маслова, где для расчета вводится коэффициент сопротивления сдвигу. Это связано с тем, что на глубоких карьерах с глубиной резко увеличиваются сжимающие нагрузки, поэтому получается вогнутый профиль с очень пологим углом в нижней части. Данный метод рекомендуется применять для установления ориентировочного профиля откоса, а также для определения углов откосов отдельных уступов.

Метод круглоцилиндрической поверхности скольжения дает результаты, близкие к результатам по методу ВНИМИ. Применим он для определения устойчивости откосов бортов, сложенных из пород, в которых предполагаемая поверхность скольжения близка к круглоцилиндрической.

Заниженные коэффициенты запаса устойчивости откосов дает метод горизонтальных сил Н.Н. Маслова-Берера. Принятый в этом

методе неточный способ проектирования сил на горизонтальную плоскость приводит к большому увеличению их в области призмы активного давления.

По сравнению с другими методами метод ВНИМИ является более универсальным. Его можно применять при различных условиях залегания горных пород, наличии поверхностей ослабления и различной глубине разработки. В настоящее время именно этот метод является основным методом расчета устойчивости откосов бортов карьеров при открытой и комбинированной разработке месторождений [3, 11, 12].

В настоящее время углы нерабочих бортов карьеров составляют 20–40 град, однако зарубежный опыт показывает, что углы нерабочих бортов карьеров, сложенных скальными породами, могут составлять до 55 град.

Обосновать такие углы существующими методиками расчета устойчивости невозможно. Существующие инженерные методики ВНИМИ, которые широко используются при проектировании открытой и комбинированной разработки месторождений, не учитывают напряженно-деформированное состояние массива и, следовательно, не позволяют обоснованно выбирать оптимальные параметры погашения откосов бортов.

В настоящее время для оценки устойчивости откосов с учетом их напряженного состояния применяются строгие математические подходы с некоторыми упрощающими допущениями о виде напряженного состояния, определения формы и положения поверхности скольжения.

Расчеты устойчивости ведутся по круглоцилиндрической или прямолинейной линии скольжения. Однако практика показывает, что деформации бортов карьеров представляют собой сферическую поверхность [14].

Для инженерных расчетов объемного коэффициента запаса устойчивости откоса, не подработанного и подработанного подземными выработками, может быть использовано суммирование удерживающих и сдвигающих сил с учетом изменчивости их направлений по сферической поверхности скольжения и с учетом изменения физико-механических свойств массива пород [4, 5, 8].

Суммирование удерживающих и сдвигающих сил с учетом изменчивости их направлений по изогнутой поверхности скольжения предложено в работах [6, 9, 10].

Этот метод можно применить и для подработанных бортов карьеров с учетом изменения физико-механических свойств массива – сцепления и угла внутреннего трения (рис. 5).

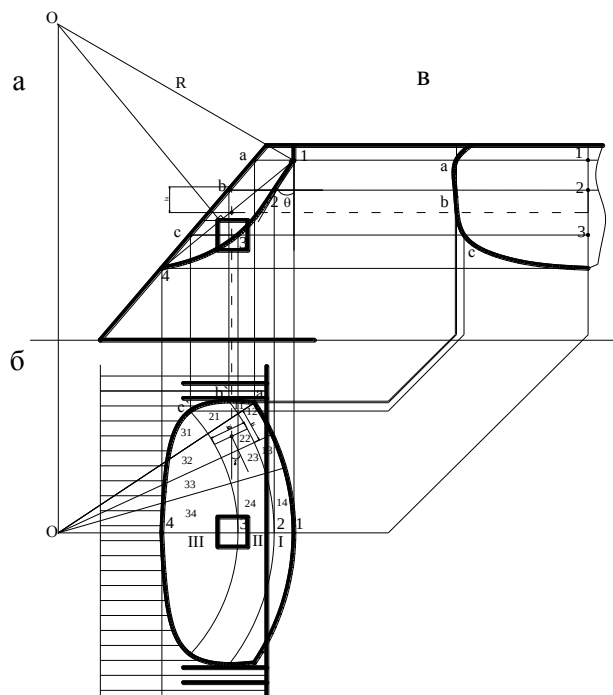


Рис. 5. Схема для расчета коэффициента запаса устойчивости по пространственной, наиболее вероятной поверхности скольжения подработанного борта

При расчете коэффициента запаса устойчивости по предлагаемой методике рекомендуется в сегментах, в которых расположены подземные выработки, через которые проходит линия скольжения, сцепление принять равным 0, угол внутреннего трения снизить на процентное соотношение длины линии скольжения, проходящей через выработку, к общей длине линии скольжения (обычно 7–30%). В соседних с выработками сегментах призмы скольжения сцепление и угол внутреннего трения необходимо снизить на аналогичное процентное соотношение (в среднем 18%)[7].

Результаты исследования и их обсуждения

По предлагаемой методике были рассчитаны коэффициенты запасов устойчивости откосов бортов карьеров медно-колчеданных месторождений. Результаты расчетов показали, что коэффициент запаса устойчивости, рассчитанный по методике с учетом объемных сил, выше рассчитанного по методике ВНИМИ на 20–25%. Данные результаты позволяют принять угол откоса более крутым с достаточным запасом устойчивости и в то же время уменьшить экономические затраты по добыче полезного ископаемого.

Заключение

Применение предложенных методик по обоснованию параметров откосов бортов карьеров, учитывающих напряженно-деформированное состояние массива, и разработка новых, учитывающих тектонические силы, позволит снизить количество оползней и обрушений при различных способах добычи полезных ископаемых, в том числе и при комбинированной разработке месторождений.

Таким образом, станет возможным совершенствование системы предупреждения аварий и ЧС на горных предприятиях именно при обосновании основных параметров разработки на стадии проектирования.

Список литературы

1. Статистические данные деятельности подразделений военизированных горноспасательных частей за период 2009–2014 годы: [Электронный ресурс]. URL: <http://www/mchs.gov.ru> (дата обращения: 22.09.2015).
2. Демин А.М. Оползни в карьерах: анализ и прогноз. М.: ГЕОС, 2009. 79 с.
3. Мануйлов П.И. Из опыта проектирования устойчивых откосов бортов карьеров // Вопросы устойчивости и структуры массива горных пород при осушении рудных месторождений : [сборник статей] / Гос. ком. по черной и цвет. металлургии при Госплане СССР; [ред. М. Ф. Монтрель]. М.: Недра, 1965. С. 100–114.
4. Свиридова Т.В. Применение методики расчета устойчивости откосов с учетом объемно-напряженного состояния пород для предупреждения оползневых процессов // Концепт. 2014. Т. 21. С. 166–170.
5. Гавришев С.Е., Кузнецова Т.С., Некерова Т.В. Методика обоснования параметров бортов карьеров при выемке прибортовых запасов подземным способом // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2010. № 1. С. 14–17.
6. Черчинцева Т.С., Кузнецова Т.С. Геомеханические основы прогноза объемных деформаций и устойчивости откосов горных пород: монография. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2007.
7. Некерова Т.В. Геомеханическое обоснование параметров бортов карьеров при комбинированной разработке рудных месторождений: дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск, 2010. 163 с.
8. Мочалов А.М., Павлович А.А., Кубарев В.Ю. Геометрическое сложение сил по наиболее напряженной поверхности скольжения при оценке устойчивости бортов карьеров // Записки горного института. 2013. Т. 204. С. 110–116.
9. Оценка общей устойчивости бортов Сибайского карьера при отработке законтурных запасов руды подземным способом / Гавришев С.Е., Заляднов В.Ю., Кравчук Т.С., Павлова Е.В., Погорелов А.Ю. // Маркшейдерское и геологическое обеспечение горных работ. 2013. С. 155–163.
10. Оценка устойчивости бортов карьера «Камаган» при подземной доработке месторождения / Мажитов А.М., Корнеев С.А., Пыталев И.А., Кравчук Т.С. // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 15. С. 205–215.
11. Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В. Принципы проектирования и реализации горнотехнических систем с полным цик-

- лом освоения рудных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013. № 27. С. 3–11.
12. Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В. Геотехнологические и геомеханические особенности перехода от открытых к подземным работам на больших глубинах // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 56. С. 67–79.
 13. Еременко В.А., Рыльникова М.В., Есина Е.Н. Мониторинг

напряженно-деформированного состояния структурно нарушенного и удароопасного массива горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 15. С. 105–116.

14. Демин А.М., Горбачева Н.П., Рулев А.Б. Механизм формирования поверхности скольжения оползня // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № 8. С. 309–312.

Материал поступил в редакцию 21.10.15

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-4-5-10

ENSURING THE STABILITY OF PIT SLOPES IN ORDER TO PREVENT ACCIDENTS AND EMERGENCIES

Tatyana V. Sviridova – Ph.D. (Eng.), Associate Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: ntv_3110@mail.ru

Olga B. Bobrova – Assistant Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: obproshkina@mail.ru

Elena A. Volkova – Ph.D. (Eng.), Associate Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: valena.dom@rambler.ru

Aleksey Yu. Peryatinsky – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Acting Head of Department of Industrial Ecology, Health and Safety

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Yulia V. Somova – Ph.D. (Eng.), Associate Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: yuliya.somova.82@mail.ru

Abstract

Problem Statement (Relevance): This article looks at the method of engineering stable pit slopes based on the three-dimensionally stressed state of rock and aimed at the prevention of accidents and emergencies at mining sites. Mining industry is characterized by a great number of hazardous factors posing threat to the lives and health of mining personnel. Such hazardous factors, which turn mining operations into a highly complicated work process, include a great number of machinery concentrated in the working area, as well as the risk of being exposed to hazardous gases, fires and rockslides. Rockslides constitute every fourth accident that happens in mining. The biggest hazard with underground mines includes the areas where collapses can occur due to incorrect mining operation parameters selected, whereas in open pits it is slopes and walls that can cause landslides and collapses. The causes of landslides in open pit mining include poorly designed pit slopes and waste dumps; failure to comply with the design parameters; violation of the process parameters. **Objectives:** The objective is to improve the emergency prevention system at the design stage with the ultimate goal of reducing the number of collapses and landslides at mining sites. **Originality:** The existing engineering methods of VNIMI, which are extensively used in the design of open-pit and combined mining processes, tend to overlook the stress-strain state of the rock mass and therefore cannot be relied on when selecting the slope reclamation parameters. Stability calculations are carried out based on a straight line or a circular cylindrical line of slide.

However, as the practice shows, due to strain the pit slopes have a spherical shape. **Findings:** The proposed method for calculating the three-dimensional slope stability safety factor is based on adding together the holding and shear forces while allowing for the varying force direction on a spherical slide surface. **Practical Relevance:** The mining emergency prevention system improved at the design stage may reduce the number of collapses and landslides at mining sites. The authors also analysed the existing methods used to calculate the pit slope stability.

Keywords: Accident, emergency, open pit, landslide, stability factor, slide surface.

References

1. The operational statistics of mine rescue brigades for the period of 2009 to 2014. Available at: <http://www/mchs.gov.ru> (Accessed September 22, 2015).
2. Demin A.M. *Opolzni v kar'erakh: analiz i prognoz* [Landslides in open pits: analysis and forecasting]. Moscow: GEOS, 2009, 79 p.
3. Manuylov P.I. From the experience of designing stable pit slopes. *Voprosy ustojchivosti i struktury y massiva gornyh porod pri osusheni irudnyh mestorozhdenij: sbornik statey* [The problems of rock mass stability and structure during ore field drainage: A collection of papers]. Ed. by M.F. Montrel. Moscow: Nedra, 1965, pp. 100–114.
4. Sviridova T.V. The application of the slope stability design method allowing for the three-dimensionally stressed state of rock and aimed at preventing landslides. *Concept*. 2014, vol. 21, pp. 166–170.
5. Gavrishchev S.E., Kuznecova T.S., Nekserova T.V. The methods of justifying pit slope parameters when mining the near-slope

- rock. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2010, no. 1, pp. 14–17.
6. Cherchinceva T.S., Kuznecova T.S. *Geomekhanicheskie osnovy prognoza obemnykh deformatsiy ustoychivosti otkosov gornykh porod: monografiya* [The geomechanical basis for three-dimensional strain and slope stability forecasting: monograph]. Magnitogorsk: NMSTU, 2007.
7. Nekerova T.V. *Geomekhanicheskoe obosnovanie parametrov bortov kar'erov pri kombinirovannoy razrabotke rudnykh mestorozhdenij. Diss. kand. tekhn. nauk* [The geomechanical justification of pit slope parameters in combined mining. Ph.D. dissertation]. Magnitogorsk, 2010, 163 p.
8. Mochalov A.M., Pavlovich A.A., Kubarev V.Yu. A composition of geometric forces acting on the most extreme sliding surfaces for the evaluation of the pit slope stability. *Zapiski gornogo instituta*. [Mining Institute Notes]. 2013, no. 204, pp. 110–116.
9. Gavrishev S.E., Zaliadnov V.Yu., Kravchuk T.S., Pavlova E.V., Pogorelov A. Yu. The analysis of the overall slope stability of the Sibaiskiy quarry during the underground mining of ore outside the pit envelope. *Marksheiderskoe i geologicheskoe obespechenie gornykh rabot* [Surveying and geological support in mining]. 2013, pp. 155–163.
10. Mazhitov A.M., Korneev S.A., Pytalev I.A., Kravchuk T.S. The analysis of the slope stability at the Kamagan quarry in the underground clean-up operations. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten* [Mining bulletin]. 2015, no. 15, pp. 205–215.
11. Kaplunov D.R., Rylnikova M.V. Full-cycle ore mining system design and implementation principles. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten* [Mining bulletin]. 2013, no. 27, pp. 3–11.
12. Kaplunov D.R., Rylnikova M.V. The geotechnological and geomechanical features of the transition from opencast to deep underground operations. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten* [Mining bulletin]. 2015, no. 56, pp. 67–79.
13. Eremenko V.A., Rylnikova M.V., Esina E.N. Monitoring of the stress-strain state of deformed and bump hazardous rock mass. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten* [Mining bulletin]. 2015, no. 15, pp. 105–116.
14. Demin A.M., Gorbacheva N.P., Rulev A.B. The forming mechanism of the landslide slip surface. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten* [Mining bulletin]. 2009, no. 8, pp. 309–312.

Received 21/10/15

Обеспечение устойчивости откосов бортов карьеров с целью предупреждения аварий и чрезвычайных ситуаций / Свиридова Т.В., Боброва О.Б., Волкова Е.А., Перятинский А.Ю., Сомова Ю.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т.14. №4. С. 5–10. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-4-5-10

Sviridova T.V., Bobrova O.B., Volkova E.A., Peryatinsky A.Yu., Somova Yu.V. Ensuring the stability of pit slopes in order to prevent accidents and emergencies. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 4, pp. 5–10. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-4-5-10

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621.73-412.004.12

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-4-11-19

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ СЛИТКА И УСЛОВИЙ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ ГОЛОВНОЙ ЧАСТИ НА ПРОЦЕССЫ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ И РАЗВИТИЕ ВНУТРЕННИХ ДЕФЕКТОВ

Гаманюк С.Б., Руцкий Д.В., Зюбан Н.А., Чубуков М.Ю., Пузиков А.Я.

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

Аннотация

Актуальность и цели: для производства полых поковок применяются как прибыльные слитки нормальной длины, так и удлиненные прибыльные и бесприбыльные слитки. Наиболее перспективными в смысле обеспечения качественных характеристик изделий и экономических показателей производства являются слитки с заголовочной головной частью. **Материалы и методы:** объектом исследования являлся слиток с заголовочной головной частью массой 1,53 т стали 38ХНЗМФА, отлитый с использованием прибыли-холодильника объемом 10,8%. Процесс кристаллизации и структурообразования исследуемого слитка проводили с помощью физического моделирования на плоских моделях – изложницах с прозрачными стенками. Исследование литого металла слитка на макроструктуру проводили путём травления. Математическое моделирование процесса кристаллизации слитка осуществлялось с помощью системы компьютерного моделирования «Crystal». **Результаты и выводы:** результаты физического моделирования слитков с различным объемом заголовочной надставки позволили выявить особенности затвердевания как всего слитка, так и различных его областей. Математическим моделированием получена зависимость, связывающая геометрические параметры слитка (отношение H/D) с относительной глубиной проникновения усадочной раковины в тело слитка. Для количественной оценки эффективности воздействия прибыли-холодильника на вертикальную кристаллизацию был проведён расчёт тепловой работы заголовочной и утепляющей прибыльной надставки. Установлено, что в слитках с заголовочной головной частью зона осевой рыхлости в 2 раза меньше в диаметре и короче по высоте по сравнению с обычными слитками. Химическая неоднородность обычных слитков развита весьма значительно, а в слитке с заголовочной головной частью более равномерно. Расположение усадочной раковины в слитке с заголовочной головной частью вдоль его оси при значительном диаметре обеспечивает ее удаление при изготовлении поковки. Слиток с заголовочной головной частью характеризуется минимальной трудоёмкостью при подготовке к разливке и имеет наименьшую головную обрезь. Применение этой технологии обеспечивает выравнивание содержания ликвирующих элементов по высоте слитка и улучшает его структурные и качественные характеристики.

Ключевые слова: слиток с заголовочной головной частью, кристаллизация, химическая и структурная неоднородность, усадочные дефекты, ливкация, физическое и математическое моделирование.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 16-08-01029 А и № 15-08-08098 А конкурса СП-2015 (СП-4573.2015.1).

Введение

Увеличение единичной мощности машин и агрегатов, создание крупных энергетических установок, развитие атомной энергетики ставят перед металлургами задачу повышения качества изделий, что в свою очередь вызывает необходимость разработки эффективных технологий, снижающих физическую, химическую и структурную

турную неоднородность затвердевающих слитков, поскольку служебные характеристики кованых изделий в значительной степени связаны с качеством кузнечного слитка.

Для повышения служебных свойств стальных изделий применяют различные методы воздействия на жидкий и затвердевающий металл: вибрацию, вращение, продувку газами, электромагнитное перемешивание, модифицирование и т.д. Данные методы, используемые как самостоятельно, так и в сочетании между

собой, дают недостаточный положительный эффект при существенном повышении трудоемкости производства.

Машиностроительные предприятия, располагающие соответствующим парком литейной оснастки, позволяющей получать слитки размером от 1 до 200 т и выше, производят поковки самой широкой номенклатуры, при этом до 80 % из них являются полыми (валы роторов, кольца, толстостенные трубы, обечайки, корпусные детали и др.) [1–5].

Для производства полых поковок применяются как прибыльные слитки нормальной длины, так и удлиненные прибыльные и бесприбыльные слитки. Наиболее перспективными в смысле обеспечения качественных характеристик изделий и экономических показателей производства являются слитки с захоложенной головной частью [6–10]. Вместо «классической» прибыльной надставки используется надставка-холодильник с относительным объемом порядка 4%. Её предназначение в том, чтобы компенсировать усадку затвердевающего металла до тех пор, пока фронты кристаллизации, движущиеся в горизонтальном направлении от боковых стенок изложницы, не сблизятся на достаточную величину, обеспечив тем самым получение в теле слитка узкой усадочной раковины. В то же время у стенки головной части должен затвердеть слой металла достаточной толщины, чтобы его прочности хватило для надежной фиксации слитка захватом манипулятора при ковке.

Металл осевой части тела слитка со следами усадочной раковины удаляется в ходе последующей обработки прошивкой или сверлением заготовки. Слитки с захоложенной головной частью характеризуются повышенной химической однородностью, что обеспечивает стабильность величин механических свойств металла готовых изделий.

Материалы и методы исследования

Для производства полых поковок под руководством профессора Жульева С.И. был разработан слиток с захоложенной головной частью [11], успешно опробованный при получении полых заготовок на ПО «Баррикады» [12, 13].

По результатам проведенных исследований под руководством профессора Жульева С.И. в ОАО «Буммаш» (г. Ижевск) были разработаны и внедрены уширенные книзу слитки с захоложенной головной частью (рис. 1) [14, 15].

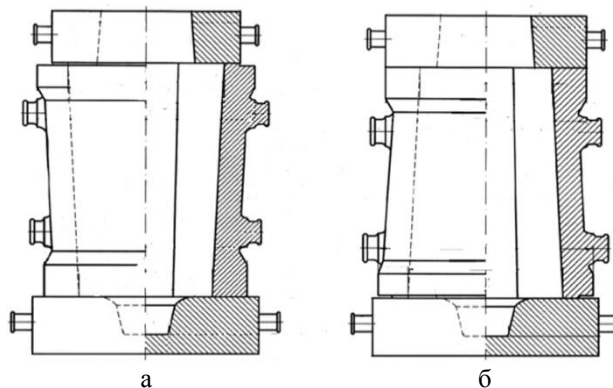


Рис. 1. Схема слитков с надставкой-холодильником: а – уширенный сверху слиток [9]; б – уширенный книзу слиток [15]

Объектом исследования являлся слиток с захоложенной головной частью массой 1,53 т стали 38ХНЗМФА, отлитый с использованием при-были-холодильника объемом 10,8%.

После полного затвердевания слиток подвергался смягчающему отжигу для снятия внутренних напряжений и облегчения его последующей резки. После термообработки из слитка механической порезкой вырезали продольные осевые плиты толщиной 25 мм последующей порезкой на шлифы. Плоскость порезки слитков была выбрана перпендикулярно поверхности отвода тепла, с тем чтобы можно было определять структуру в периферийных и срединных слоях металла. Исследование литого металла слитка стали 38ХНЗМФА на макроструктуру проводили путём травления.

Пробы для химического анализа отбирали на шлифах, вырезанных из темплетов с трех горизонтов слитка. Химический анализ образцов проводился спектральным методом ГОСТ 18895-97 на приборе ARC-Met 930.

Особенность кинетики кристаллизации и структурообразования слитков с различным утеплением головной части изучалось с помощью физического моделирования на плоских моделях – изложницах с прозрачными стенками [16, 17]. В качестве модельного расплава использовался натрий серноватистоокислый (раствор кристаллического гипосульфита) $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \times 5\text{H}_2\text{O}$. Выбор расплава для холодного моделирования достаточно подробно и обосновано приведен в работе [18].

Математическое моделирование процесса кристаллизации слитка осуществлялось с помощью системы компьютерного моделирования «Crystal» [19], расчеты в котором ведутся методом конечных разностей.

Результаты исследования

Слиток с захоложенной головной частью характеризуется минимальной трудоёмкостью при подготовке к разливке и имеет наименьшую головную обрезь.

Применение этой технологии обеспечивает выравнивание содержания ликвирующих элементов по высоте слитка и улучшает его структурные и качественные характеристики (рис. 2, 3 и таблица).

В слитках с захоложенной верхней частью зона осевой рыхлости в 2 раза меньше в диаметре и короче по высоте по сравнению с обычными слитками. Это объясняется меньшей протяженностью зоны затрудненного питания на заключительном этапе кристаллизации слитка и, следовательно, лучшей её подпиткой жидким расплавом. Вместе с тем при ускоренной кристаллизации ликвационные процессы имеют меньшее развитие, что сокращает температурный интервал затвердевания и, как следствие, величину усадки.

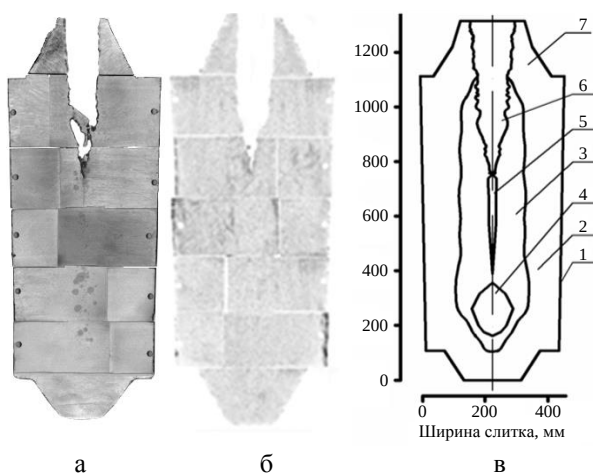


Рис. 2. Структура слитка с захоложенной головной частью [12]: а – макроструктура слитка; б – серный отпечаток; в – структурные зоны слитка: 1 – корковая зона; 2 – зона столбчатых кристаллов; 3 – зона равноосных кристаллов; 4 – конус осаждения; 5 – осевая зона; 6 – усадочная раковина; 7 – головная часть

Усадочная раковина в слитке с захоложенной верхней частью может занимать до 50% от его высоты и 30% от среднего диаметра слитка (см. рис. 3).

Обработка данных, полученных в системе компьютерного моделирования «Crystal» [19], по влиянию конусности (уширенных кверху и уширенных книзу) слитков с захоложенной головной частью показала, что в слитках с обратной ко-

нусностью усадочная раковина менее развита по ширине и имеет большее развитие по высоте. Увеличение массы слитков приводит к большему развитию усадочной раковины в теле уширенных кверху и низу слитках.

Расположение усадочной раковины в слитке с захоложенной верхней частью вдоль его оси при незначительном диаметре обеспечивает ее удаление при изготовлении полой поковки.

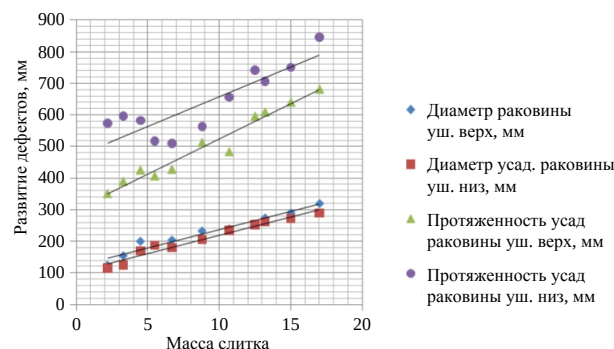


Рис. 3. Влияние массы слитка с захоложенной головной частью на развитие усадочной раковины в теле слитка

Химическая неоднородность обычных слитков развита весьма значительно. Это связано не только с образованием областей отрицательной и положительной объёмной ликвации (соответственно в нижней и верхней частях прибыльных слитков), но и с зональной ликвацией, проявляющейся в виде развитых шнуров с повышенным содержанием углерода, серы, фосфора. В слитке с захоложенной головной частью эти элементы распределены более равномерно (рис. 4, см. таблицу).

Химическая неоднородность слитков

Ликвация, %	Слиток массой 1,7 т с утепляющей надставкой [20]	Слиток массой 1,53 т с надставкой-холодильником	Слиток массой 2,07 т с надставкой-холодильником [15]
Положительная:			
углерода	+10,8	+3,0	+2,0
серы	+18,8	+7,1	–
фосфора	+18,0	0	–
Отрицательная:			
углерода	–8,1	–3,0	–3,7
серы	–6,3	–14,3	–
фосфора	–9,1	–11,1	–
Суммарная:			
углерода	18,9	6,0	5,7
серы	25,1	21,4	–
фосфора	27,1	11,1	–

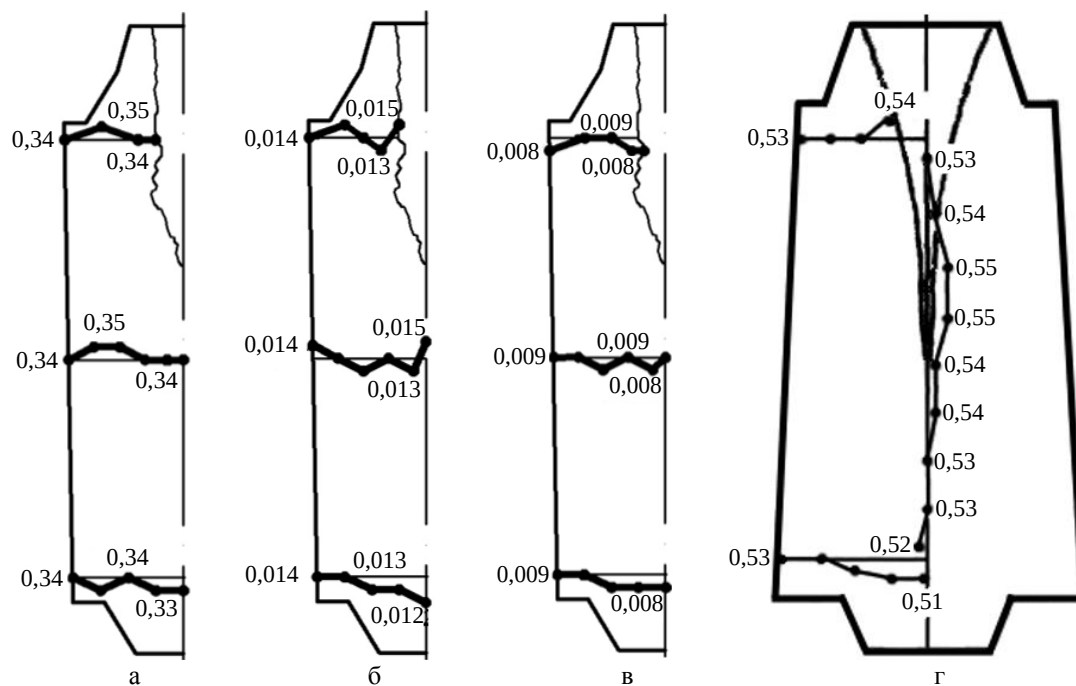


Рис. 4. Химическая неоднородность слитков с захоложенной головной частью:
а–в – распределение углерода, серы и фосфора в слитке массой 1,53 т стали 38ХНЗМФА;
г – распределение углерода в слитке массой 2,07 т стали 5ХНМФ

Результаты физического моделирования слитков с различным объёмом захлаживающей надставки приведены на рис. 5.

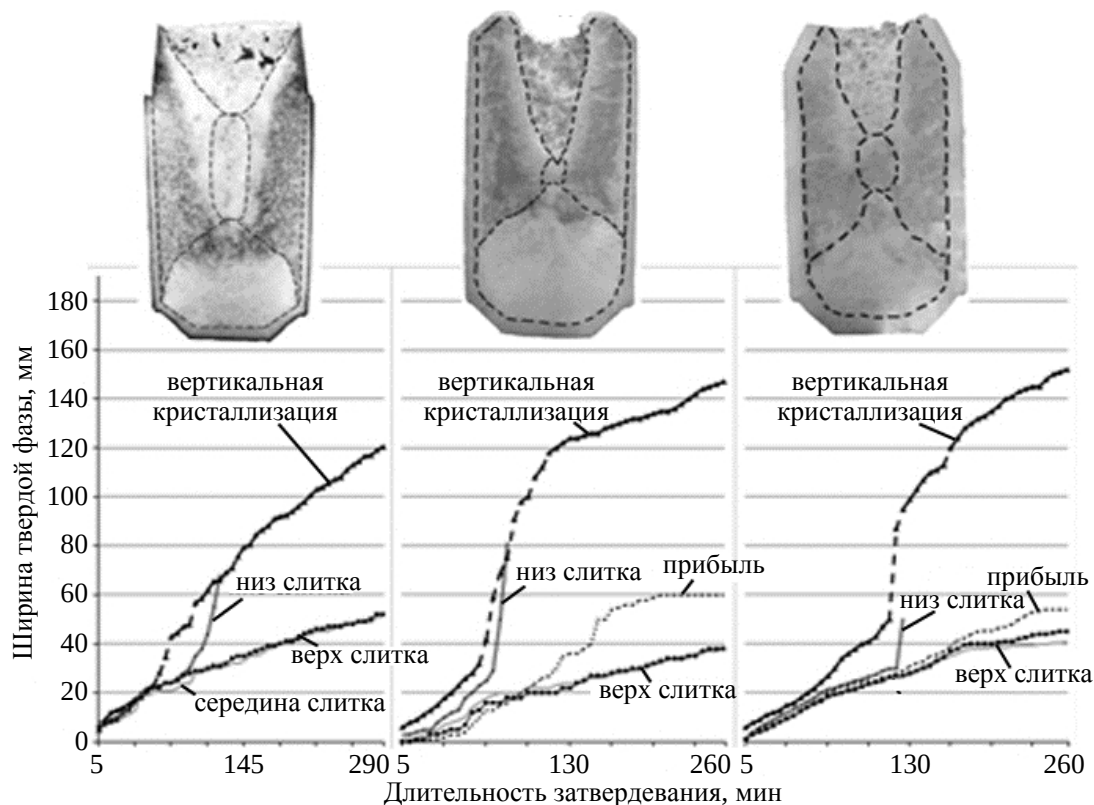


Рис. 5. Динамика нарастания твёрдой фазы модельных слитков в зависимости от времени затвердевания: а – слиток с утепляемой головной частью;
б – слиток с захлаживаемым объёмом (11,6%); в – слиток с захлаживаемым объёмом (21,8%)

Физическое моделирование в условиях «захолаживания» головной части позволило выявить особенности затвердевания как всего слитка, так и различных его областей в зависимости от условий теплоотвода. В случае использования утепляющей прибыльной надставки (**рис. 5, а**) рост твёрдой фазы в вертикальном направлении практически имеет прямо пропорциональную зависимость. Это характеризует равномерность процесса затвердевания модельного слитка традиционной формы. При захолаживании расплава объемом 11,6% (**рис. 5, б**) пропорциональный участок вертикальной кристаллизации сохраняется в течение 50 мин (27% от всего времени затвердевания), после чего интенсивность затвердевания возрастает (вертикальный участок кривой), что обусловлено смыканием вертикального фронта кристаллизации. Увеличение захолаживающего объема до 21,8% (**рис. 5, в**) приводит к возрастанию пропорционального участка равномерной кристаллизации до 110 мин. Динамика дальнейшего процесса кристаллизации практически не отличается от предыдущего случая (см. **рис. 5, б**). Изменение объемов захолаживания головной части привело к изменению общего времени вертикального затвердевания для всех типов слитков.

Изменение скорости вертикальной кристаллизации в зависимости от времени затвердевания и условий охлаждения приведено на **рис. 6**. Высокие значения вертикальной скорости в начальные моменты кристаллизации во всех рассматриваемых случаях практически идентичны и обусловлены значительным градиентом температур между расплавом и поддоном. Снижение теплоотвода за счёт нарастания затвердевшего слоя приводит к снижению температурного градиента и, как следствие, резкому снижению скорости кристаллизации (для всех случаев).

Дальнейшее возрастание скорости кристаллизации связано с формированием дендритного каркаса и затвердеванием слитка практически по всему объёму. Однако в случае с утепляющей прибылью этот процесс тормозится относительно медленным затвердеванием осевых и прилегающих к ним объёмов слитка за счёт воздействия прибыли, чем и объясняется небольшой рост, а затем снижение скорости

кристаллизации. В случае применения захолаживающих прибыльных надставок наблюдается более интенсивный рост скорости кристаллизации, однако максимальное значение этой величины характерно для надставки с объёмом 11,6%. При объёме захолаживающей части 21,8% эти значения меньше, что можно объяснить снижением температурного градиента по высоте слитка, несмотря на интенсивные процессы кристаллизации за счёт сращивания зоны равноосных кристаллов.

Учитывая существенное влияние захолаживающей прибыли на формирование осевой зоны, математическим моделированием была получена зависимость, связывающая геометрические параметры слитка (отношение H/D) с относительной глубиной проникновения усадочной раковины в тело слитка L , % [21]:

$$L = -66,358 \cdot (H/D)^3 + 336,57 \cdot (H/D)^2 - 574,697 \cdot (H/D) + 365,696, \quad (1)$$

$$R = 0,999.$$

Анализ полученной модели показывает, что с увеличением H/D от 1,3 до 2,4 относительная протяжённость усадочной раковины в слитках с захолаженной головной частью снижается с 40 до 22%. Использование этих результатов позволяет выбирать оптимальную геометрию слитков данного типа с благоприятным расположением дефектов усадочного происхождения. Для количественной оценки эффективности воздействия прибыли холодильника на вертикальную кристаллизацию был проведён расчёт тепловой работы захолаживающей и утепляющей прибыльной надставки. Результаты расчёта в виде теплового баланса прибыльной надставки для случая захолаживания и утепления приведены на **рис. 7**. Из представленных данных видно, что при использовании захолаживаемой прибыли наблюдается более чем двукратное поглощение тепла расплавленного металла прибылью-холодильником (77,7%) по сравнению со слитком с утепляющей прибыльной надставкой (36,67%), что повышает интенсивность теплоотвода в головной части слитка и обеспечивает ускорение процесса затвердевания металла.

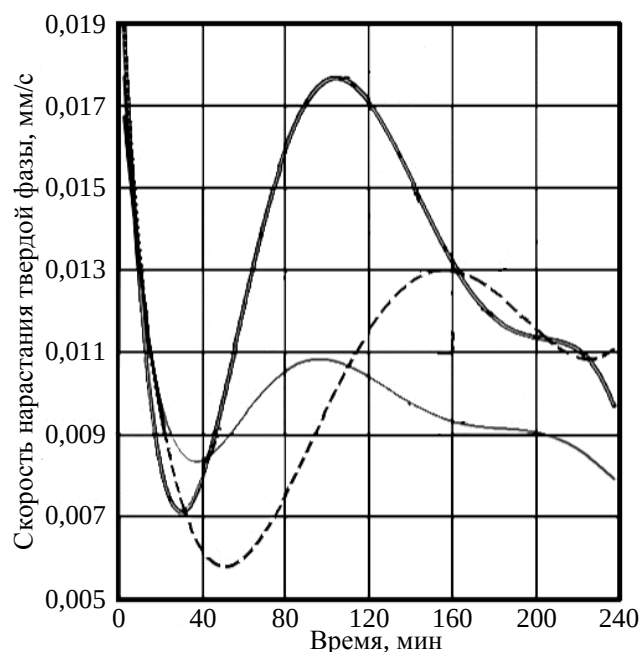
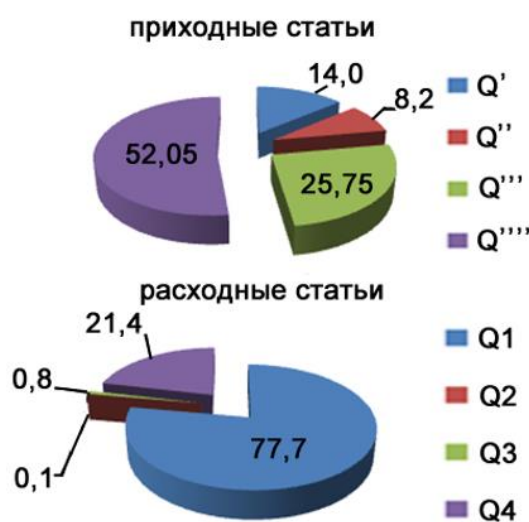


Рис. 6. Изменение скорости вертикальной кристаллизации модельных слитков в процессе затвердевания расплава: 1 – слиток с захолаживаемой прибыльной надставкой объёмом 11,6%; 2 – слиток с захолаживаемой прибыльной надставкой объёмом 21,8%; 3 – слиток с утепляющей прибылью

Слиток стали 38ХНЗМФА массой 1,53 т с прибылью- холодильником



Обычный слиток стали 20 массой 6,61 т



Рис. 7. Баланс тепловой работы захолаживаемой и утепляющей прибыльных надставок:
 Q' – теплота, выделившаяся при охлаждении расплава от температуры разливки до температуры ликвидус; Q'' – теплота, выделившаяся при охлаждении металла от температуры ликвидус до температуры солидус; Q''' – теплота, выделившаяся при охлаждении металла от температуры солидус до средней температуры металла в прибыли на момент окончания процесса; Q'''' – скрытая теплота кристаллизации; Q_1 – количество тепла, расходуемого на нагрев футеровочных материалов и корпуса прибыльной надставки; Q_2 – количество тепла, излучаемого с наружной поверхности прибыльной части изложницы; Q_3 – количество тепла, излучаемого через зеркало металла прибыльной части слитка; Q_4 – количество тепла, переданного телу слитка

Заключение

Таким образом, предлагаемый слиток с заохлажденной головной частью превосходит слиток обычной геометрии по своим качественным и структурным характеристикам.

Подробное исследование литой структуры металла слитка с заохлажденной головной частью показало, что наиболее дефектная зона со значительным преобладанием факторов, способных негативно сказаться на качестве металла слитка, расположена в осевой части слитка. Благоприятное расположение дефектов усадочного происхождения в слитке, приводит к гарантированному удалению в отход при ковке.

Применение «заохлаживания» головной части дает двукратное поглощение тепла затвердевающего металла надставкой-холодильником, что приводит к возрастанию скорости затвердевания слитка практически по всему объему и, как следствие, снижению химической неоднородности металла.

Полученные результаты позволяют проводить целенаправленный выбор соответствующей конфигурации слитка, обеспечивающей изготовление качественной полой поковки с минимальным развитием ликвационной неоднородности и контролируемым расположением усадочных дефектов.

Список литературы

1. Zhbankov I.G., Perig A.V. Forging of ingots without hot tops. *Materials and Manufacturing Processes*. 2013, vol. 28, no. 3, pp. 229–235.
2. Machovčák P., Tkadlečková M., Opler A., Carbol Z., Trefil A., Michalek K. The development of new type of 90 ton forging ingot. *Conference Proceedings: 23rd International Conference on Metallurgy and Materials, METAL 2014; Czech Republic; 2014*, pp. 72–80.
3. Jiang Z.-H., Liu F.-B., Yu Q., Chen X., Zang X.-M., Deng X. Development of a new technology for manufacture of hollow ingots by electroslog remelting process. *Kang T'ieh/Iron and Steel*, vol. 50, iss. 10, 2015, pp. 30–36.
4. Ao G.W., Shen M.G., Zang Z.S., Li B.L. Study on unidirectional solidification ingot with hollow lateral wall insulation. *Metallurgija*, vol. 55, iss. 4, 2016, pp. 597–600.
5. Liu M., Ma Q.X. Modeling and numerical simulation research on hollow steel ingot forging process of heavy cylinder forging. *4th International Conference on Manufacturing Science and Engineering, ICMSE 2013; Dalian; China, 2013*, vol. 712–715, pp. 627–632.
6. Кулешов Н.И. Разработка системы автоматизированного выбора слитка с учётом его весовых, геометрических и структурных характеристик: дис. ... канд. техн. наук. Днепродзержинск, 1993. 187 с.
7. Скобло С.Я., Казачков Е.А. Слитки для крупных поковок. М.: Металлургия, 1973. 248 с.
8. Жульев С.И., Зюбан Н.А. Влияние параметров изготовления крупных кузнечных слитков на формирование оптимальной структуры осевой зоны // *Металлург*. 2001. №12. С. 38–39.
9. Samoilovich Yu.A., Timoshpol'skii V.I., Trusova I.A. Possibility of forming an ingot with a convex crystallization front. *Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal*, 2001, no. 1, vol. 74, pp. 134–138.
10. Samoilovich Yu. A., Timoshpol'skiy V. I. The analysis of thermo-gravitational convection in the liquid kernel of solidified steel ingots. Part 2. The role of the configuration of a liquid kernel. *Vestsi Natsiyanal'nai Akademii Navuk Belarusi. Series of physical-engineering sciences*, 2006, no. 1, pp. 5–9.
11. Жульев С.И. Оптимизация процессов производства кузнечных слитков для поковок ответственного назначения с использованием САПР-технологий: дис. ... д-ра техн. наук. Волгоград, 1991. 372 с.
12. Шамрей В.А. Исследование слитков с заохлажденной верхней частью и их использование для производства полых поковок: дис. ... канд. техн. наук. М.: ЦНИИЧЕРМЕТ, 2007. 146 с.
13. Шамрей В.А., Жульев С.И. Новая форма кузнечного слитка для изготовления полых кованых изделий // *Металлург*. 2007. № 11. С. 54–57.
14. Разработка литейной оснастки и технологии отливки кузнечных слитков: отчет о НИР / ООО «МетМаш»; рук. Жульев С.И. Волгоград, 2007. 106 с.
15. Колодкин М.В. Оптимизация тепловой работы кузнечных слитков для производства полых изделий с улучшенными технико-экономическими показателями: дис. ... канд. техн. наук. М.: ЦНИИТМАШ, 2010. 140 с.
16. П. м. 135551 Российская Федерация, МПК В22Д7/08. Модель изложницы для исследования процесса кристаллизации слитков / Н.А. Зюбан, Д.В. Руцкий, А.Н. Галкин, С.Б. Гаманюк, Е.А. Косова, А.Я. Пузиков; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ВолГТУ». № 2013120789/02; заявл. 06.05.2013; опубл. 20.12.2013.
17. П. м. 141550 Российская Федерация, МПК В22Д7/08. Модель изложницы для исследования процесса кристаллизации слитков / Н.А. Зюбан, Д.В. Руцкий, А.Н. Галкин, С.Б. Гаманюк, Е.А. Косова, А.Я. Пузиков; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ВолГТУ». № 2014100754/02; заявл. 09.01.2014; опубл. 10.06.2014.
18. Эльдарханов А.С., Ефимов В.А., Нурадинов А.С. Процессы формирования отливок и их моделирование. М.: Машиностроение, 2001. 208 с.
19. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2013613206 от 28.03.2013 РФ. Система компьютерного моделирования «Crystal» / В.П. Багмутов, И.Н. Захаров, Н.А. Зюбан, Д.В. Руцкий, С.Б. Гаманюк; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ВолГТУ». № 2013611342; заявл. 12.02.2013; опубл. 20.06.2013.
20. Руцкий Д.В. Исследование химической неоднородности кузнечных слитков для крупногабаритных заготовок тяжелого машиностроения: дис. ... канд. техн. наук. М.: ЦНИИТМАШ, 2006. 134 с.
21. Влияние заохлаживания головной части на условия кристаллизации стального слитка и качество полученных из него поковок / А.Н. Галкин, Н.А. Зюбан, Д.В. Руцкий и др. // *Металлург*. 2013. № 3. С. 54–59.

Материал поступил в редакцию 07.09.16.

THE EFFECT OF INGOT GEOMETRY AND INGOT TOP SOLIDIFICATION CONDITIONS ON SOLIDIFICATION AND THE DEVELOPMENT OF INTERNAL DEFECTS

Sergey B. Gamanyuk – Ph.D. (Eng.), Associate Professor
Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia. E-mail: tecmat@vstu.ru

Dmitry V. Rutsikii – Ph.D. (Eng.), Associate Professor
Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia. E-mail: tecmat@vstu.ru

Nikolai A. Zyuban – D.Sc. (Eng.), Professor
Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia. Phone: +7(8442)24-81-58. E-mail: tecmat@vstu.ru

Mikhail Yu. Chubukov – Postgraduate Student
Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia. E-mail: tecmat@vstu.ru

Artem Ja. Puzikov – Postgraduate Student
Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia. E-mail: tecmat@vstu.ru

Abstract

Relevance and Objectives: Both crop top ingots of normal length and elongated crop top ingots as well as elongated ingots without crop tops are used for the fabrication of hollow forgings. Chilled top ingots provide the best efficiency both in terms of final product quality and performance indicators. **Materials and Methods Applied:** The object of research is a 1.53 ton chilled top ingot of '38XH3MΦA' steel teemed with a 10.8% cooling top extension. 2D ingot models with transparent walls were used for the physical modeling of crystallization and structure formation in the ingot under study. Etching was applied when examining the macrostructure of the cast ingot metal. The process of crystallization was studied with the help of the Crystal simulation software. **Findings:** Based on the physical modeling results obtained for model ingots with cooling top extensions of various volumes, we were able to identify the solidification patterns typical of both the whole ingot and its parts. With the help of mathematical modeling, a relationship was obtained which correlates the ingot geometry (H/D ratio) with the relative depth of the shrinkage cavity. For quantitative assessment of the vertical solidification efficiency supported by the mold cooling top extension, calculations were done to determine the thermal performance of a chilling top extension and a warmth-keeping top extension. It was established that the axial porosity zone in chilled top ingots is twice smaller in diameter and in length compared with that in conventional ingots. While conventional ingots have a significant chemical heterogeneity, in chilled top ingots these elements are more evenly distributed. The location of the shrinkage cavity along the chilled top ingot centerline ensures the cavity can be easily eliminated when the ingot is used for a hollow forging provided the shrinkage cavity is only minor. Chilled top

ingots require only minimum preparation cost and have minimum top scrap. This technology provides a more homogeneous distribution of segregates along the height of the ingot and improved structure and quality.

Keywords: Chilled top ingot, solidification, chemical and structural heterogeneity, shrinkage, segregation, physical and mathematical modeling.

This research was conducted as part of Research Projects No. 16-08-01029 A and No. 15-08-08098 A within the SP-2015 (SP-4573.2015.1) grant competition with support from the Russian Foundation for Basic Research.

References

1. Zhbakov I.G., Perig A.V. Forging of ingots without hot tops // Materials and Manufacturing Processes. 2013, vol. 28, no. 3. pp. 229–235.
2. Machovčák P., Tkadlečková M., Opler A., Carbol Z., Trefil A., Michalek K. The development of new type of 90 ton forging ingot. Conference Proceedings: 23rd International Conference on Metallurgy and Materials, METAL 2014; Czech Republic; 2014, pp. 72–80.
3. Jiang Z.-H., Liu F.-B., Yu Q., Chen X., Zang X.-M., Deng X. Development of a new technology for manufacture of hollow ingots by electroslag remelting process. Kang T'ieh/Iron and Steel, vol. 50, iss. 10, 2015, pp. 30–36.
4. Ao G.W., Shen M.G., Zang Z.S., Li B.L. Study on unidirectional solidification ingot with hollow lateral wall insulation. Metalurgija, vol. 55, iss. 4, 2016, pp. 597–600.
5. Liu M., Ma Q.X. Modeling and numerical simulation research on hollow steel ingot forging process of heavy cylinder forging. 4th International Conference on Manufacturing Science and Engineering, ICMSE 2013; Dalian; China, 2013, vol. 712–715, pp. 627–632.
6. Kuleshov N.I. *Razrabotka sistemy avtomatizirovannogo vybora slitka s uchjotom ego vesovyh, geometricheskikh i strukturnykh harakteristik. Diss. cand. tekhn. nauk* [The development of an automatic ingot selection system based on weight, geometry and structure. Ph.D. dissertation]. Dnepropetrovsk, 1993. 187 p. (In Russ.)

7. Skoblo S.Ya., Kazachkov E.A. *Slitki dlja krupnyh pokovok* [Large forging ingots]. Moscow: Metallurgy, 1973, 248 p. (In Russ.)
8. Zhulyev S.I., Zyuban N.A. The effect of large forging ingot production parameters on the optimization of the axial zone structure formation. *Metallurg* [Metallurgist], 2001, no. 12, pp. 38–39. (In Russ.)
9. Samoilovich Yu.A., Timoshpol'skii V.I., Trusova I.A. Possibility of forming an ingot with a convex crystallization front. *Inzhenero-Fizicheskii Zhurnal*, 2001, no. 1, vol. 74, pp. 134–138.
10. Samoilovich Yu. A., Timoshpol'skii V. I. The analysis of thermo-gravitational convection in the liquid kernel of solidified steel ingots. Part 2. The role of the configuration of a liquid kernel. *Vestsi Natsiyanalnai Akademii Navuk Belarusi. Series of physical-engineering sciences*, 2006, no. 1, pp. 5–9.
11. Zhulyev S.I. *Optimizacija processov proizvodstva kuznechnykh slitkov dlja pokovok otvetstvennogo naznachenija s ispol'zovaniem SAPR-tehnologii. Diss. dokt. tekhn. nauk* [Optimized CAD-based forging ingot production process for heavy-duty forgings. Doctoral dissertation]. Volgograd, 1991. 372 p. (In Russ.)
12. Shamrey V.A. *Issledovanie slitkov s zaholozhennoj verhnjej chast'ju i ih ispol'zovanie dlja proizvodstva polykh pokovok. Diss. cand. tekhn. nauk* [A study of chilled top ingots and hollow forgings produced from chilled top ingots. Ph.D. dissertation]. Moscow: TsNIICHERMET, 2007. 146 p. (In Russ.)
13. Shamrey V.A., Zhulyev S.I. A new shape of forging ingots designed for hollow forged products. *Metallurg* [Metallurgist], 2007, no. 11, pp. 54–57. (In Russ.)
14. MetMash LLC. R&D report: Designing a forging ingot mold and a teeming technology. Led by S.I. Zhulyev. Volgograd, 2007, 106 p. (In Russ.)
15. Kolodkin M.V. *Optimizacija teplovoj raboty kuznechnykh slitkov dlja proizvodstva polykh izdelij s uluchshennymi tekhniko-ekonomicheskimi pokazateljami. Diss. cand. tekhn. nauk* [Optimized thermal performance of forging ingots intended for the manufacture of hollow products with enhanced performance indicators. Ph.D. dissertation]. Moscow: TsNIITMASH, 2010. 140 p. (In Russ.)
16. Zyuban N.A., Rutskii D.V., Galkin A.N., Gamanyuk S.B., Kosova E.A., Puzikov A.Ya. *Model' izlozhnicy dlja issledovaniya processa kristallizacii slitkov* [A model mold to study ingot solidification]. Patent RF, no. 135551, 2013. (In Russ.)
17. Zyuban N.A., Rutskii D.V., Galkin A.N., Gamanyuk S.B., Kosova Ye.A., Puzikov A.Ya. *Model' izlozhnicy dlja issledovaniya processa kristallizacii slitkov* [A model mold to study ingot solidification]. Patent RF, no. 141550, 2014. (In Russ.)
18. Eldarkhanov A.S., Efimov V.A., Nuradinov A.S. *Processy formirovaniya otlivok i ih modelirovanie* [Casting formation processes and their modeling]. Moscow: Mashinostroyeniye, 2001, 208 p. (In Russ.)
19. Bagmutov V.P., Zakharov I.N., Zyuban N.A., Rutskii D.V., Gamanyuk S.B. *Sistema komp'yuternogo modelirovaniya «Crystal»* [The Crystal computer simulation software]. State registration certificate for a computer application, no. 2013613206, 2013. (In Russ.)
20. Rutskii D.V. *Issledovanie himicheskoy neodnorodnosti kuznechnykh slitkov dlja krupnogabaritnykh zagotovok tjazhelogo mashinostroyeniya. Diss. cand. tekhn. nauk* [Investigation of the chemical heterogeneity of forging ingots intended for heavy engineering applications. Ph.D. dissertation]. Moscow: TsNIITMASH, 2006. 134 p. (In Russ.)
21. Galkin A.N., Zyuban N.A., Rutskii D.V., Gamanyuk S.B., Puzikov A.Ya., Firsenko V.V. The effect of a chilled top on the solidification conditions in steel ingots and the quality of resultant forgings. *Metallurg* [Metallurgist], 2013, no. 3, pp. 54–59. (In Russ.)

Received 07/09/16

Влияние геометрии слитка и условий затвердевания головной части на процессы структурообразования и развитие внутренних дефектов / Гаманюк С.Б., Руцкий Д.В., Зюбан Н.А., Чубуков М.Ю., Пузиков А.Я. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т.14. №4. С. 11–19. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-4-11-19

Gamanyuk S.B., Rutskii D.V., Zyuban N.A., Chubukov M.Yu. Puzikov A.Ja. The effect of ingot geometry and ingot top solidification conditions on solidification and the development of internal defects. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 4, pp. 11–19. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-4-11-19

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ГРАФИТА НА КАЧЕСТВО СОЛЯНЫХ СТЕРЖНЕЙ

Усков И.В.¹, Гильманшина Т.Р.¹, Беляев С.В.¹, Богданова Т.А.², Усков Д.И.¹, Партыко Е.Г.¹

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

² ООО «КиК», Красноярск, Россия

Аннотация

Изучены возможности повышения качества соляного стержня на основе карбамида за счет введения в его состав скрытокристаллического графита Курейского месторождения. Показано, что введение графита, активированного в планетарной мельнице RETSCH PM 400 MA, в количестве 5–15% изменяет характер кристаллизации стержня и приводит к перераспределению раковины в мелкую, равномерно распределенную по его сечению газовую пористость за счет появления центров кристаллизации – активных частиц графита, сорбирующих на себе газы, выходящие из соляной смеси в процессе ее приготовления. Размеры пор и долю поверхности стержней, покрытой порами, оценивали по фотографиям, полученным в программе SiamS Photolab на микроскопе OBSERVER.D1m фирмы Zeiss, которые затем обрабатывали при помощи программы «Расчет пористости поверхности изделий». Было показано, что при введении графита до 10 мас. % размеры пор уменьшаются с 0,19 до 0,14 мм (на поверхности стержня) и с 1,54 до 0,85 мм (внутри стержня); доля поверхности, занятая порами, при этом уменьшается с 1,27 до 0,03%. При дальнейшем увеличении содержания графита (до 15 мас. % и более) поры на поверхности и внутри стержня отсутствуют. Высокие характеристики поверхности соляного стержня обеспечиваются за счет плавной (равновесной) кристаллизации соляного расплава, что подтверждается результатами дифференциально-термического анализа. Введение графита существенно не меняет параметры кристаллизации. Результаты исследований влияния содержания графита на шероховатость соляных стержней, оцененных на профилометре TR200, показали, что наиболее оптимальным количеством графита, вводимым в состав соляного стержня, является 5% (R_a уменьшалось с 0,538 до 0,08), что ведет к снижению шероховатости отливки.

Ключевые слова: графит, соляной стержень, шероховатость, поры, кристаллизация.

Введение

Модернизация существующих и создание новых машин и приборов потребовало разработки деталей сложной конфигурации, которым предъявляются высокие требования к точности их размеров и качеству поверхности. К таким деталям относятся разнообразные по конструкции волноводы, которые представляют собой тонкостенные детали со сложной конфигурацией каналов. Основным показателем качества волноводов является точность размеров каналов и минимальная шероховатость поверхности. Гальванопластика или гибка специальных профилей с последующей пайкой характеризуется низкой эффективностью. Одним из перспективных процессов изготовления волноводов является литье. Среди многообразия современных способов литья по выплавляемым моделям занимает особое

положение в связи с главной его особенностью – возможностью изготовления из разнообразных сплавов отливок сложной конфигурации. Литьем по выплавляемым моделям изготавливают отливки с высокой плотностью металла, шероховатостью поверхности R_z 20–10 и менее. Однако значительная часть отливок (~78%) имеет точность размеров по 14–17 квалитетам СТ СЭВ 144–75. Недостаточная точность размеров отливок снижает эффективность данного способа литья и увеличивает сроки освоения [1–3].

Исследование влияния содержания графита на качество соляных стержней

Решение задачи повышения точности размеров отливок волноводного класса, изготовленных по выплавляемым моделям, является актуальной задачей, решение которой способствует улучшению служебных характеристик радиоэлектронной аппаратуры. Поэтому представляет интерес разработка эффективных легкоудаляе-

мых водорастворимых соляных стержней для изготовления высококачественных отливок со сложными внутренними полостями, не требующих последующей механической обработки.

В работе [4] приведены основные требования к соляным стержням:

- должны иметь достаточную термомеханическую прочность и не разрушаться запрессовываемым в полость формы сплавом;
- должны обеспечивать получение поверхности отливки по 6–7-му классам чистоты и по 3-му классу точности.

С другой стороны, как показано в работе [5], применение легкоудаляемых стержней ограничено их нестабильными и невысокими физико-механическими свойствами: соляные стержни имеют высокую усадку и низкую прочность, высокие остаточные термические напряжения, что приводит к повышенному трещинообразованию, а также высокую гигроскопичность, что ограничивает срок их хранения и затрудняет нанесение защитных покрытий.

В настоящее время разработано достаточно большое количество составов соляных стержней и методов улучшения их качества [6–10]. Одним из направлений, позволяющих улучшать качество соляных стержней, является введение в их состав графита [11].

Поэтому цель данной работы – исследовать возможность повышения качества соляных стержней за счет введения в их состав графита. Для исследований выбран скрытокристаллический графит Курейского месторождения, режим активации которого подробно рассмотрен в работах [12–14]. Качество стержней оценивали по следующим параметрам: доля поверхности стержня, покрытая порами, шероховатость стержня. Долю поверхности стержней, покрытую порами, оценивали следующим образом: в программе SiamPhotolab на микроскопе OBSERVER.D1m фирмы Zeiss получали фотографию макроструктуры образца; при помощи программы «Расчет пористости поверхности изделий» оценивали диаметр и количество пор, присутствующих на поверхности образца (рис. 1, 2); оценивали общую поверхность, занятую порами; в процентном отношении оценивали долю площади, занятой порами

от общей площади образца.

Результаты изменений вывели в виде таблицы, в которой были приведены данные по диаметру каждой измеренной поры, средний диаметр пор.

Шероховатость стержней оценивали на профилемере TR200.

Результаты исследования макро- и микро-структуры и разрез стержней с различным содержанием графита показаны на рис. 3–6.

Из представленных данных видно, что на поверхности стержня с 5% графита присутствуют поры, которые носят газовый характер. Внутри стержней также присутствуют поры, носящие газоусадочный характер.

Полученные данные можно объяснить тем, что введение графита приводит к перераспределению раковины в мелкую, равномерно распределенную по сечению стержня газовую пористость за счет появления центров кристаллизации – активных частиц графита, сорбирующих на себе газы, выходящие из соляной смеси в процессе ее приготовления.

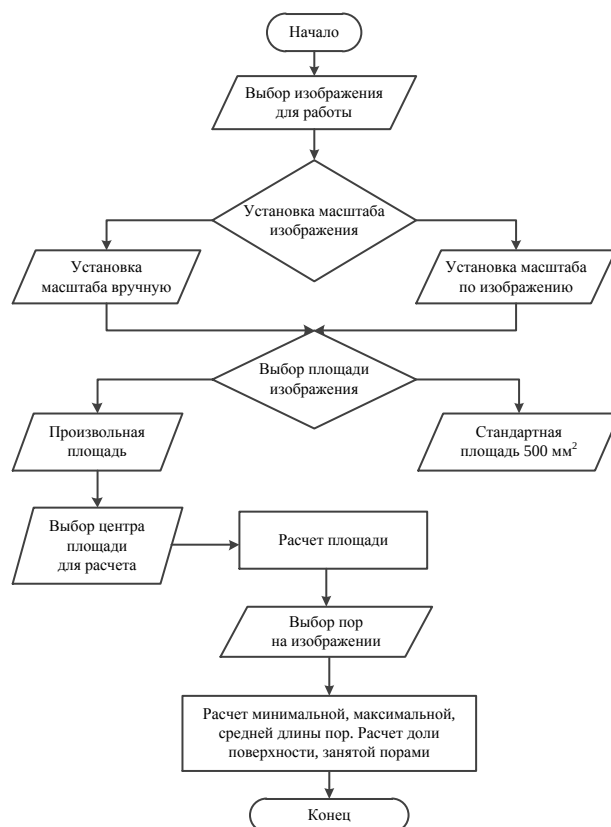


Рис. 1. Блок-схема программы

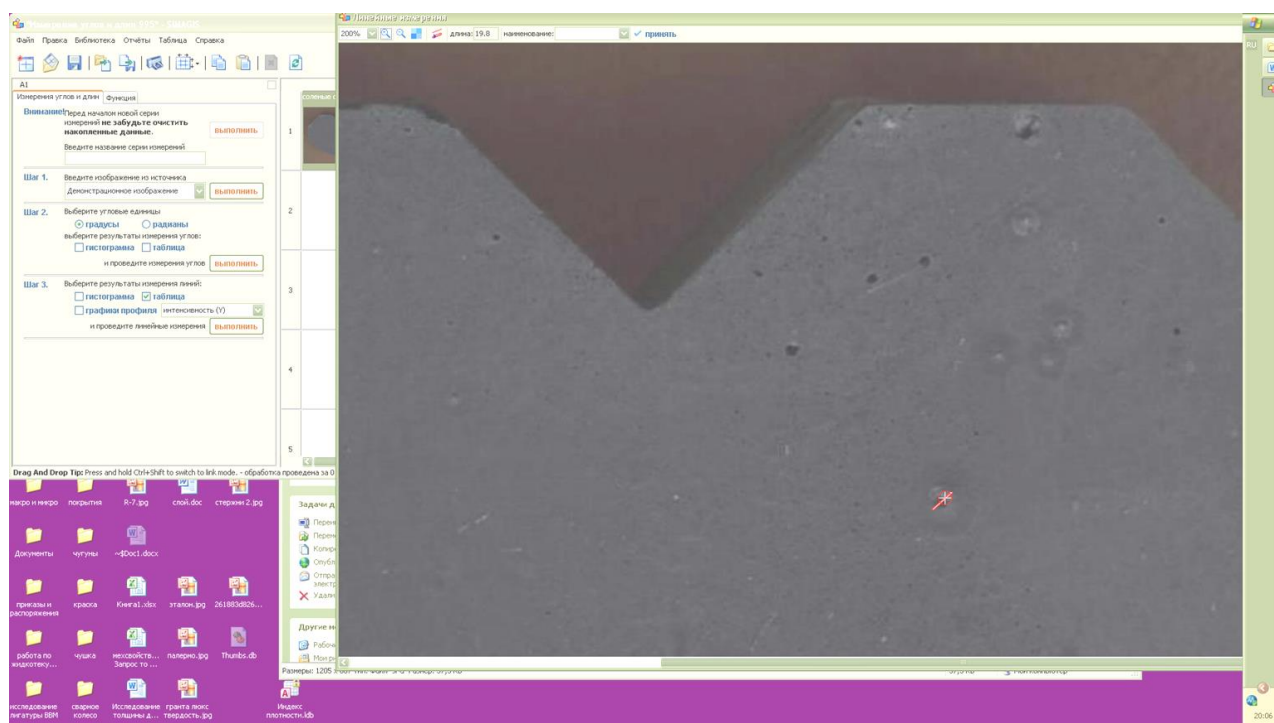
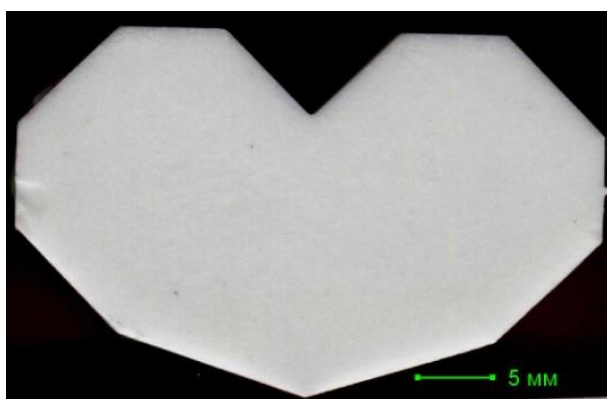
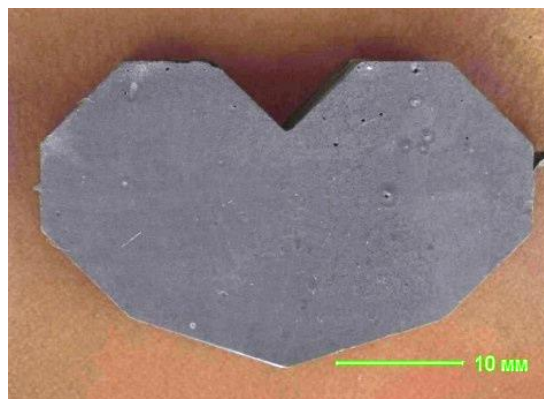


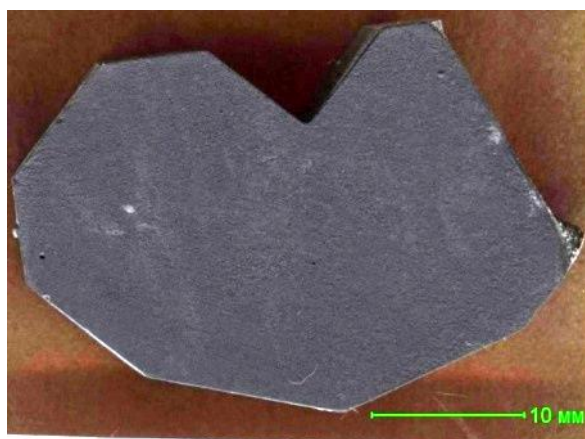
Рис. 2. Макроструктура соляного стержня с выделенной порой



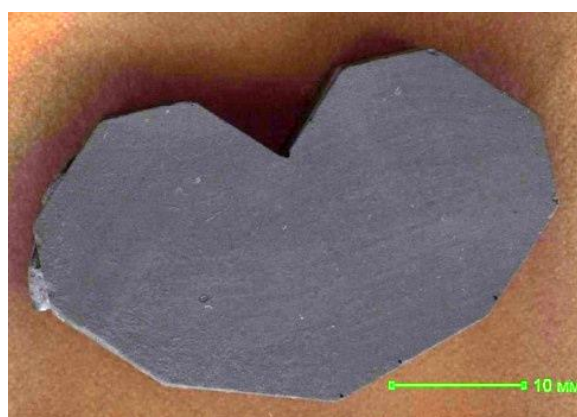
а



б



в



г

Рис. 3. Макроструктура соляных стержней с различным содержанием графита, %:
а – без графита; б – 5; в – 10; г – 15

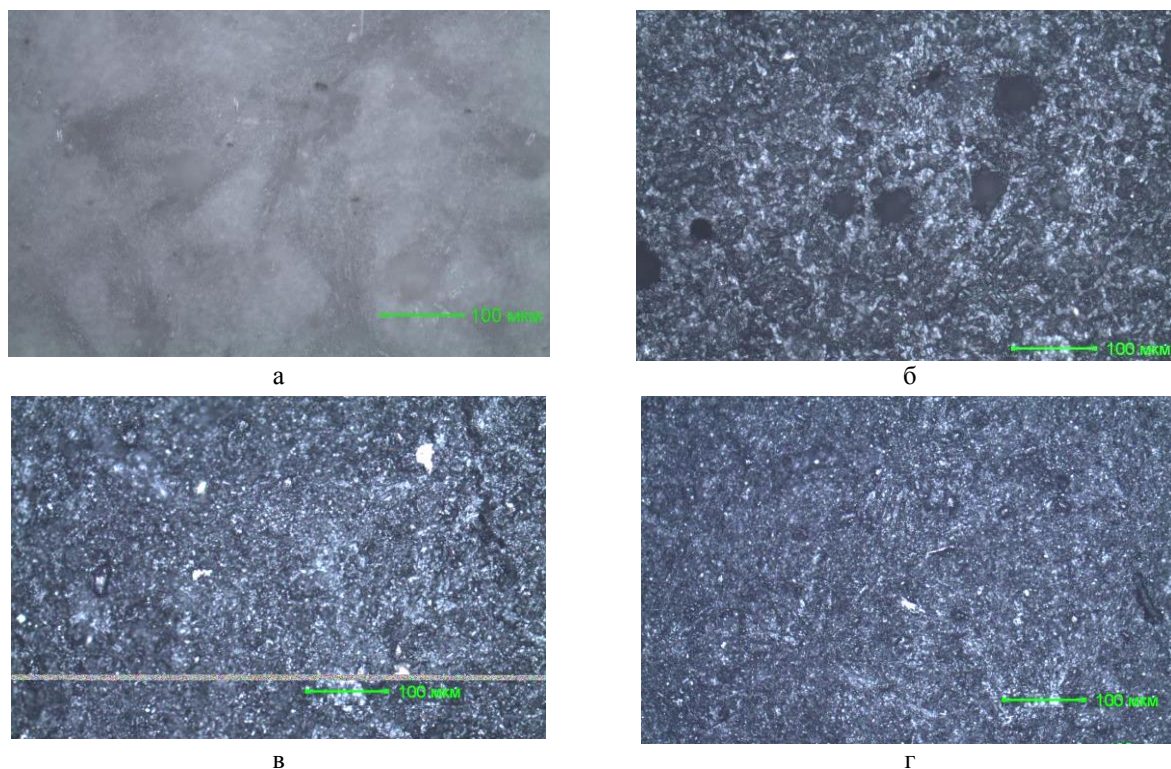


Рис. 4. Микроструктура соляных стержней с различным содержанием графита, %:
а – без графита; б – 5; в – 10; г – 15

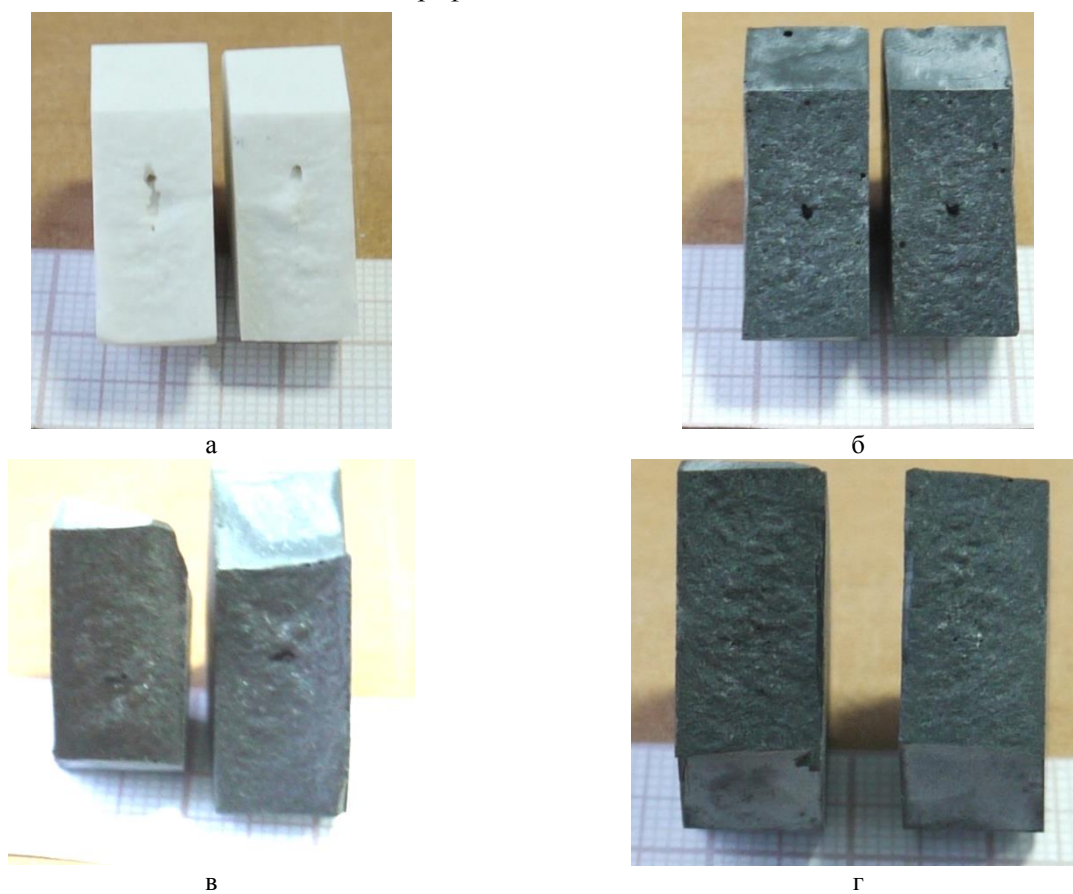


Рис. 5. Разрез соляных стержней с различным содержанием графита, %:
а – без графита; б – 5; в – 10; г – 15

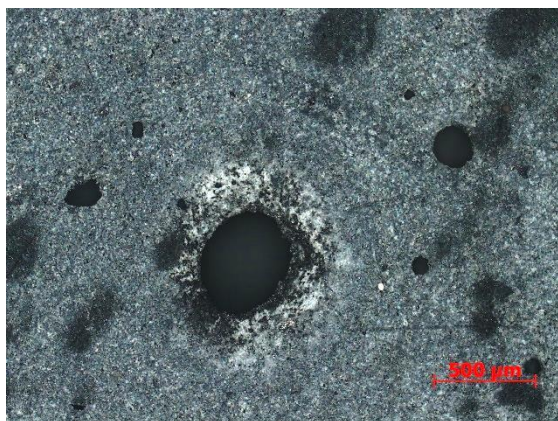
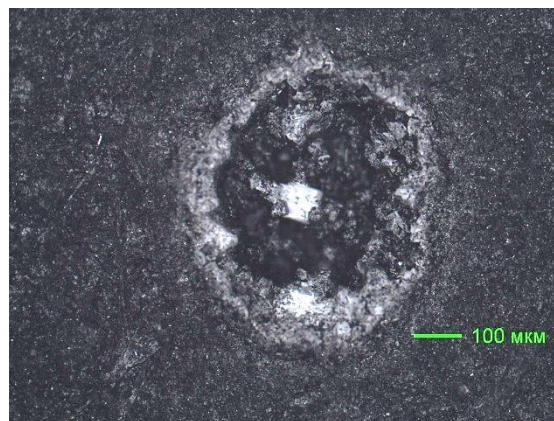


Рис. 6. Пора в объеме стержней



Повышение содержания графита приводит к увеличению центров кристаллизации и тем самым более равномерному распределению пористости по сечению стержня.

Результаты расчетов приведены в **таблице**.

Определение пористости на поверхности и внутри стержня с различным содержанием графита

Параметр	Содержание графита, %		
	0	5	10
На поверхности стержня			
Число пор	53	13	9
Размеры пор, мм:			
минимальное значение	0,05	0,1	0,02
максимальное значение	0,86	0,2	0,28
среднее значение	0,19	0,15	0,14
Доля поверхности, занятая порами, %	1,27	0,10	0,03
Внутри стержня			
Число пор	2	8	1
Размеры пор, мм:			
минимальное значение	0,84	0,01	0,85
максимальное значение	2,23	1,18	0,85
среднее значение	1,54	0,25	0,85
Средне квадратичное отклонение, мм	0,98	0,39	0,00
Медиана, мм	2,23	0,17	0,85
Размах, мм	0,00	0,14	0,00

На поверхности соляных стержней, содержащих в своем составе 15% графита, поры отсутствуют как на поверхности стержня, так и внутри его. Поэтому расчеты пор для этих стержней не представлены.

Результаты исследований влияния содержания графита на шероховатость соляных стержней представлены на **рис. 7**, из которого видно, что наиболее оптимальным количеством графита, вводимым в состав соляного стержня, является 5%.

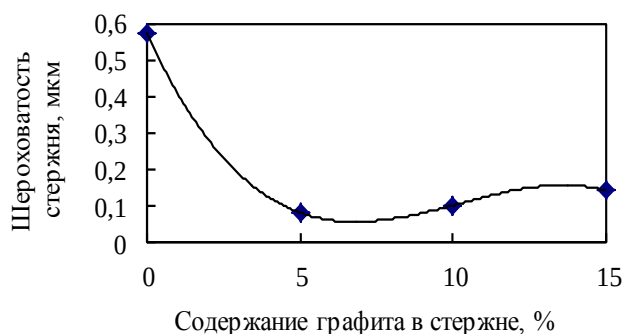


Рис. 7. Влияние содержания графита в составе соляных стержней на их шероховатость

Высокие характеристики поверхности соляного стержня обеспечиваются за счет плавной (равновесной) кристаллизации соляного расплава, что подтверждается результатами дифференциально-термического анализа.

Выводы

Таким образом, проведенные исследования показали, что введение активированного графита в состав соляного стержня приводит к перераспределению газовой раковины в его центре в мелкую, равномерно распределенную по всему сечению газовую пористость за счет появления активных частиц графита, сорбирующих на себе газы, выходящие из соляной смеси в процессе ее приготовления. Результаты исследований влияния содержания графита на шероховатость соляных стержней показали, что наиболее оптимальным количеством графита, вводимым в состав соляного стержня, является 5% (R_a уменьшалось с 0,538 до 0,08).

Список литературы

1. Чернышев П.А., Халикова К.К. Расчет динамики формирования размера при литье по выплавляемым моделям отливки типа волновод // Машиностроительные технологии: материалы студ. науч. конф. 2010. С. 1–6.

2. Water-soluble cores – verifying development trends / Eliška Adámková, Petr Jelínek, Jaroslav Beňo, František Mikšovský // *Materiali in tehnologije*. 2015. 249. 1. P. 61–67.
3. Advances in Technology of Soluble Cores for Die Castings / P. Jelínek, E. Adámková, F. Mikšovský, J. Beňo // *Archives of foundry engineering*. 2015. Vol. 15, iss. 2. P. 29–34.
4. Материал стержней [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://hydromech.kiev.ua/2014/10/material-sterzhnej>
5. Ruddl, R.W. The solidification of castings / R.W. Ruddl. London, 1957. 162 p.
6. Охлаждаемые металлические стержни с теплозащитным покрытием / А.А. Бондарь, Ю.М. Дудзинский, К.В. Колесник, О.И. Воронова // *Technology audit and production reserves*. 2013. № 3/2(11). С. 9–11.
7. Свойства модельных составов [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.juwelir.info/index.php/shtampovka/literovuplyayemymodelyam/464-svoystva_model_nyh_sostavov.
8. А. с. 1031631 СССР, МПК В 22 С 1/02. Смесь для изготовления водорастворимых литейных стержней / Б.А. Краев, М.Н. Чурик, В.П. Шибанов; заявитель и патентообладатель НИИЛИТавтопром. № 3407222/22-02; заявл. 17.03.82; опубл. 30.07.83, Бюл. № 28.
9. Заявка на пат. 2011105861 DE, МПК В 22 С 9/10. Стержни на солевой основе и способ их изготовления / Тиманн Дирк, Шиллер Гудрун, Кэфер Дитер [и др.]; заявитель и патентообладатель КЕРАМТЕК ГМБХ (DE). № 2011105861/02; заявл. 20.07.09; опубл. 27.08.12, Бюл. № 24.
10. Method of manufacturing expendable salt core for casting and expendable salt core for casting [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.faqs.org/patents/app/20090205801#xzz3oUsswPra>.
11. Изготовление соляных стержней для получения прецизионных отливок / Т.Р. Гильманшина, И.В. Усков, С.В. Беляев [и др.] // *Литейное производство*. 2014. № 8. С. 17–20.
12. Наноструктурированные графитсодержащие изделия / Л.И. Мамина, С.В. Беляев, Т.Р. Гильманшина [и др.]. Красноярск: Сиб. фед. ун-т, 2013. 268 с.
13. Гильманшина Т.Р. Разработка способов повышения качества литейного графита отдельными и комплексными методами активации: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Челябинск: Юж.-Урал. гос. ун-т, 2004. 16 с.
14. Исследование зависимости качества природного скрытокристаллического графита от режимов подготовки / Баранов В.Н., Довженко Н.Н., Гильманшина Т.Р. [и др.] // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2015. № 2(50). С. 54–59.

Материал поступил в редакцию 11.02.16.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-4-20-26

STUDYING THE EFFECT OF GRAPHITE CONCENTRATION ON THE QUALITY OF SALT CORES

Igor V. Uskov – Ph.D. (Eng.), Associate Professor
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: uskov59@mail.ru

Tatiana R. Gil'manshina – Ph.D. (Eng.), Associate Professor
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: gtr1977@mail.ru

Sergey V. Belyaev – D.Sc. (Eng.), Associate Professor
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: 244812@mail.ru

Tatyana A. Bogdanova – Ph.D. (Eng.), Head of Metallurgical Department
KiK LLC, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: bat@kandk.ru

Daniel I. Uskov – Assistant Professor
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Eugene G. Partyko – Postgraduate Student
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Abstract

This article looks at the ways to improve the quality of carbamide-based salt cores by introducing some cryptocrystalline graphite from the Kureysk deposit. It is shown that the introduction of 5-15% graphite activated in the RETSCH PM 400 MA planetary mill changes the crystallization pattern of the core and turns the cavity into fine gas pores evenly distributed across the core section due to the occurrence of crystallization centers, i.e. active graphite particles which absorb gases produced by the salt mixture during its preparation. The size of the pores and the affected core surface were analysed by studying the photos which were produced on the Zeiss OBSERVER.D1m microscope with the help of the SiamsPhotolab program and processed with the help of a program designed to

calculate the surface porosity. It is demonstrated that the introduction of up to 10 wt. % of graphite led to the pore size reduction from 0.19 to 0.14 mm at the core surface and from 1.54 to 0.85 mm in the core; the surface area which had pores was reduced from 1.27 to 0.03%. An increased graphite concentration (up to 15 wt.% or more) would result in zero porosity either on the surface and in the core. The high performance of the salt core surface is due to a smooth, or equilibrium, crystallization of the salt melt, which is confirmed by the results of the differential thermal analysis. The introduction of graphite does not entail a substantial change to the crystallization parameters. The research carried out to determine how the graphite concentration can effect the salt core roughness, which was analysed with the help of the TR200 profilometer,

showed that 5% was the optimal graphite concentration for a salt core (with Ra decreased from 0.538 to 0.08) leading to less roughness in the resultant casting.

Keywords: Graphite, hydrochloric rod, roughness, pores, crystallization.

References

1. Chernyshev P.A., Khalikova K.K. Calculating the dynamics size formation in the investment casting. *Mashinostroitel'nye tekhnologii: studencheskaya nauch. konf* [Engineering technology: Students' Scientific Conference], 2010, pp. 1–6.
2. Adámková Eliška, Jelínek Petr, Beňo Jaroslav, Mikšovský František Water-soluble cores – verifying development trends. *Materiali in tehnologije*. 2015, no 249(1), pp. 61–67.
3. Jelínek P., Adámková E., Mikšovský F., Beňo J. Advances in Technology of Soluble Cores for Die Castings. *Archives of foundry engineering*. 2015, vol. 15, iss. 2, pp. 29–34.
4. *Material sterzhnej* [Core material]. Available at: <http://hydromech.kiev.ua/2014/10/material-sterzhnej>
5. Ruddl R.W. The solidification of castings. London, 1957. 162 c.
6. Bondar' A.A., Dudzinskiy Yu.M., Kolesnik K.V., Voronova o.I. Cooled metal cores with thermal barrier coatings. *Technology audit and production reserves*, 2013, no 3/2(11), pp. 9–11.
7. *Svoystva model'nykh sostavov* [Properties of waxes]. Available at: http://www.juwelir.info/index.php/shtampovka/litepovyplavlyayemyymo-delyam/464-svoystva_model_nyh_sostavov.
8. Kraev B.A., Churik M.N., Shibanov V.P. *Smes' dlya izgotovleniya vodorastvorimyykh litejnykh sterzhnej* [A wax for water-soluble cores]. A.s. SV, no. 1031631, 1983.
9. Timann Dirk, Shiller Gudrun, Kehfer Diter et al. *Sterzhni na solevoj osnove i sposob ih izgotovleniya* [Salt cores and their manufacture]. Application for Patent DE no. 2011105861, 2009.
10. Method of manufacturing expendable salt core for casting and expendable salt core for casting. Available at: <http://www.faqs.org/patents/app/20090205801#xzz3oUsswPra>.
11. Gilmanshina T.R., Uskov I.V., Belyaev S.V. et al. Production of salt cores for precision castings. *Liteynoye proizvodstvo* [Foundry]. 2014, no 8, pp. 17–20.
12. Mamina L.I., Belyaev S.V., Gil'manshina T.R. et al. *Nanos-trukturirovannyye grafitsoderzhashchie izdeliya* [Nanostructured graphite products]. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2013, 268 p.
13. Gilmanshina T.R. *Razrabotka sposobov povysheniya kachestva litejnogo grafita ot del'nymi i kompleksnymi metodami aktivacii: aforref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Developing ways to improve the quality of foundry graphite through the application of separate and combined activation methods. Extended abstract of Ph.D. dissertation]. Chelyabinsk: South Ural State University, 2004, 16 p.
14. Baranov V.N., Dovzhenko N.N., Gilmanshina T.R. et al. Studying the relationship between the quality of natural cryptocrystalline graphite and the treatment regimes. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2015, no. 2(50), pp. 54–59.

Received 11/02/16

Исследование влияния содержания графита на качество соляных стержней / Усков И.В., Гильманшина Т.Р., Беляев С.В., Богданова Т.А., Усков Д.И., Партыко Е.Г. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т.14. №4. С. 20–26. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-4-20-26

Uskov I.V., Gil'manshina T.R., Belyaev S.V., Bogdanova T.A., Uskov D.I., Partyko E.G. Studying the effect of graphite concentration on the quality of salt cores. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 4, pp. 20–26. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-4-20-26

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ЛИТЕЙНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Ольховик Е.О.¹, Десницкий В.В.²

¹ Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

Постановка задачи: в статье рассмотрено современное состояние комплекса задач при оптимизации проектирования литейной технологии для изготовления фасонных стальных отливок ответственного назначения. Выделены основные перспективные направления для исследований – геометрическая и топологическая оптимизация элементов литейной технологии автоматизированными методами конечных элементов. Описаны основные подходы для выбора целевой функции оптимизации или их набора, что необходимо для направленного формирования высоких эксплуатационных (механических) свойств металла в отливке и для конструирования технологичных по питанию стальных отливок с высокими показателями сопротивлению внешним силовым нагрузкам. **Цель работы:** в качестве объекта для исследований выбрана стальная отливка корпуса запорной (обратной) арматуры судового и общепромышленного назначения, которая имеет конструктивные особенности исполнения – бесфланцевый вариант. **Используемые методы:** для ее оптимизации выбраны целевые функции – локальный параметр направленности затвердевания и группа расчетных критериев, отвечающих за местный дефицит подпитки жидким металлом. Разработанные методы предполагают выполнение итерационного моделирования затвердевания отливки в форме с применением метода контрольного объема, на каждой расчетной итерации выполняется изменение геометрии элементов литейной технологии (прибылей, литниково-питающей системы) в соответствии с назначенной целевой функцией. За несколько проходов производится постепенное изменение геометрии детали, при этом результаты каждого шага сравниваются с предыдущим до момента достижения приемлемого результата. Приведены результаты топологической оптимизации литого корпуса. **Практическая значимость:** выполнена переработка варианта литейной технологии, позволившая перейти к новой конструкции, при этом было обеспечено высокое качество отливки без снижения механических свойств литой стали, которые замерялись методом испытаний вырезанных образцов. По результатам расчетов и прямых механических испытаний бесфланцевый литой корпус показал высокие эксплуатационные свойства, включая необходимую жесткость запорного узла.

Ключевые слова: стальные отливки, топологическая оптимизация, геометрическая оптимизация, запорная арматура, литейная технология, жизненный цикл.

Введение

Изготовление стальных фасонных отливок ответственного назначения со стабильными механическими свойствами – хорошо известная научно-техническая проблема. Здесь в качестве отдельной задачи можно выделить разработку методов направленного формирования эксплуатационных (служебных) характеристик литых деталей. Решение данной задачи позволит в значительной мере расширить необходимую информацию о жизненном цикле отливки и уже на этапе проектирования принять необходимые мероприятия для оптимизации конструкторско-технологической части. В современной постановке решение данной задачи связано с системами компьютерного анализа и моделирования технологических процессов литейного производства. Здесь главным направлением сохраняется точный анализ применяемых технологических решений, обеспечивающих формирование качественного металла отливок.

Существующие методы моделирования литейных технологий [1] предполагают только детальный анализ температурных и производных от них полей, по результатам которого выполняется доработка средств технологического обеспечения качества. В работе [2] авторы рассматривают вопросы расчета температурных полей в системе отливки – литейная форма с целью прогнозирования механических и эксплуатационных свойств литого металла отливки. В работе [3] рассмотрены вопросы моделирования формирования усадочной пористости в стальных отливках энергомашиностроения, также для оценки изменения механических свойств литого металла. В последние годы возник новый класс задач, связанных с автоматизацией процесса разработки технологии, где в качестве основного метода используются принципы геометрической и топологической оптимизации конструкции детали. Данные принципы уже хорошо зарекомендовали себя для решения задач расчета общей прочности и разработки конструкций с наиболее оптимальной геометрией и формой.

Современное состояние вопроса исследования

Большинство исследований, связанных с геометрической или топологической оптимизацией конструкции высоконагруженных деталей, основано на анализе максимальной статической нагрузки [4]. При этом результатом оптимизации является, как правило, пошаговое удаление объемов материала конструкции, имеющих наибольшие коэффициенты запаса статической прочности. В несколько проходов (расчетных итераций) производится постепенное изменение геометрии детали, при этом результаты каждого шага сравниваются с предыдущим до момента достижения приемлемого результата.

Для оптимизации литейных технологий задача усложняется тем, что в технологической цепочке производства участвует уже группа материалов (литой металл, литейная форма, стержень и другие вспомогательные материалы), процесс формирования отливки в форме является нестационарным и происходит со значительным изменением как физических, так и механических свойств всех материалов. Также геометрическая оптимизация литейной технологии осложняется выбором целевой функции, поскольку их может быть несколько, в зависимости от типа поставленной задачи.

В работе [5] авторы приводят достаточно полный научный обзор методов топологической оптимизации различных конструкций, при этом выделяют четыре основных метода оптимизации, основанных на анализе: равномерности напряженно-деформированного состояния, граничных условий (метод вариации границ), формы конструкции (структурный или геометрический метод).

Вновь разрабатываемые методы топологической оптимизации [6–8] основаны на выборе комплекса целевых функций (многопараметрическая оптимизация) для решения сразу связанного набора задач, например повышение жесткости при определенном соблюдении баланса площади поперечных сечений детали и т.п.

В работе [9] предложены методы оптимизации литниково-питающей системы (ЛПС) для повышения качества отливок и снижения объема дефектов. В качестве целевой функции была выбрана зависимость объемной усадки от условий затвердевания металла в форме. С использованием профессионального программного обеспечения были исследованы гидродинамические особенности заполнения литейной формы, смоделирован процесс формирования усадочной пористости как наиболее распространенный дефект, возникающий вследствие неправильного проектирования ЛПС. В качестве решения авторы предложили оптимизированную систему питания отливки, которая на

практике позволила уменьшить объем пористости и снизить процент брака.

В работе [10] автор приводит сравнительный анализ программных продуктов (MAGMASoft (ФРГ), ProCAST (США, Швейцария), FLOW-3D (США), WinCAST (ФРГ), Poligon (Россия), LVMFlow (Россия)), наиболее распространенных на промышленных предприятиях Российской Федерации.

В работе [11] раскрыты возможности программного комплекса CastDesigner (разработанного в МГТУ им. Н.Э. Баумана), предназначенного для конструирования технологичных по питанию стальных отливок.

В работе [12] выполнен анализ существующих математических моделей литейных процессов на предмет наиболее полного учета всех технологических и производственных факторов. Сформулированы рекомендации конструктору и технологу для выбора оптимальной схемы моделирования.

Автор [13] применил на практике методы топологической оптимизации рычага подвески грузового автомобиля, при этом был достигнут результат в виде снижения массы готового изделия.

В цикле работ [14–16] нами были предложены собственные разработки в области геометрической оптимизации стальных отливок ответственного назначения, при этом в качестве целевой функции – использование локального параметра направленности затвердевания, отвечающего за формирование плотного строения металла отливки. Для реализации расчетов разрабатывается специальное программное обеспечение, основанное на применении метода конечных элементов и распределенных вычислений.

Постановка и методы решения задачи

Основным направлением данного исследования является применение технологии топологической оптимизации с учетом всего жизненного цикла. Таким образом, общая задача представляет собой синтез двух решений: оптимизация литейной технологии и повышение общей конструктивной прочности изделия. Такая связка необходима для направленного формирования высоких эксплуатационных (механических) свойств металла в отливке за счет того, что литейная технология разрабатывается не только для обеспечения общих требований по качеству и отсутствию литейных дефектов, но и для создания более оптимальной конструкции с точки зрения сопротивления внешним нагрузкам. Такой подход был апробирован и предложен нами в работе [17].

В качестве объекта для исследований нами был рассмотрен корпус судовой запорной (обратной)

арматуры ДУ150 (материал – сталь 25Л, 08ГДНФЛ и т.п.) в двух вариантах – классический фланцевый и бесфланцевый под приварку, конструкции которых и расчетное напряженно-деформированное состояние приведены на **рис. 1**.

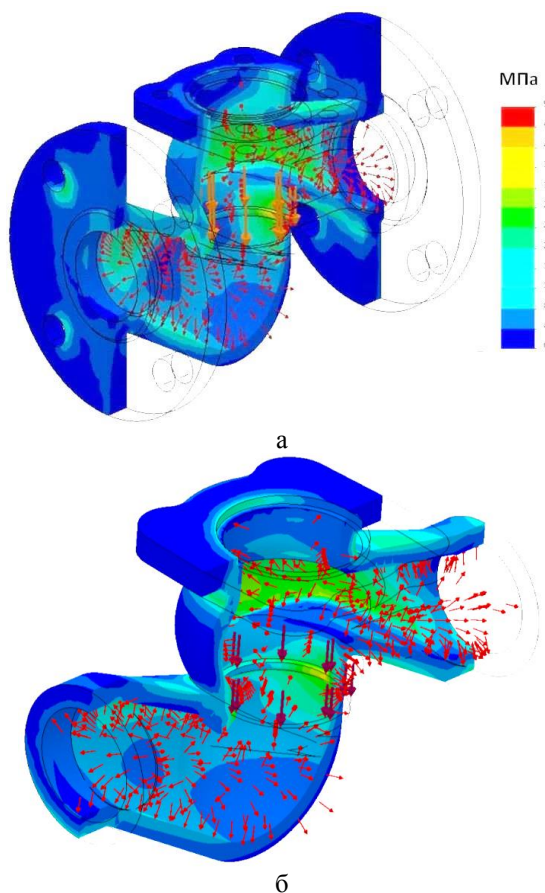


Рис. 1. Конструкция и расчетное напряженно-деформированное состояние корпуса судовой запорной арматуры (при внутреннем давлении 4,0 МПа и запирающем усилии на золотнике в 15кН), а – фланцевая конструкция; б – бесфланцевая конструкция

Данные расчеты (см. **рис. 1**) выполнялись с целью определения изменений конструктивной прочности корпуса в случае отказа от стандартных присоединительных фланцев с переходом к варианту корпуса под приварку. Расчет показал, что по критерию запаса прочности корпус не требует каких-либо значительных изменений конструкции. Было выполнено проектное увеличение толщины стенок в зоне запорного узла, поскольку его расчетная жесткость несколько ниже, чем в стандартном варианте с присоединительными фланцами. Наибольшие сложности возникли при разработке литейной технологии изготовления бесфланцевого корпуса.

Классическим вариантом литейной технологии для данной отливки является установка трех при-

былей – 2-х на присоединительных (боковых) фланцах и 1-й на среднем фланце, с сифонной литниковой системой и местом подвода в центральную часть корпуса. Такой вариант технологии широко известен и хорошо себя зарекомендовал. Бесфланцевая (под приварку) конструкция корпуса является достаточно новой и сопровождается сложностями при разработке литейной технологии. Практическая невозможность установки прибылей на боковые патрубки приводит к недостатку их питания и, как следствие, образованию пористости и локальному снижению механических свойств металла отливки. В связи с этим потребовалась оптимизация конструкции литого корпуса и разработка новых технологических решений.

За основу технологического решения (**рис. 2**) для бесфланцевого корпуса была принята технология с одной увеличенной прибылью на центральном фланце и подводом бокового питателя увеличенного диаметра в центральную часть корпуса.

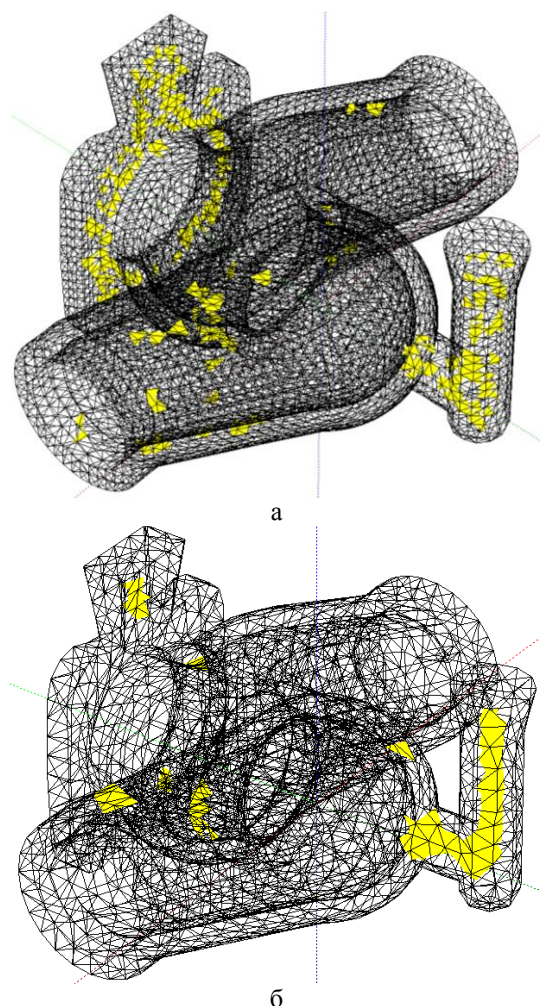


Рис. 2. Расчетные дефекты литейной технологии в бесфланцевом корпусе запорной судовой арматуры: а – дефекты по недостатку питания; б – дефекты в виде усадочной пористости

Результаты исследований

Для оценки качества разработанных литейных технологий в настоящее время используется большая группа расчетных критериев, таких как температурный градиент затвердевания, скорость затвердевания, градиент продолжительности затвердевания, критерий Ниямы, критерий Хью, критерий дефицита питания и др. Все они отвечают за формирование дефектов литого металла различной физической сущности и могут использоваться в качестве целевой функции при оптимизации геометрии отливки.

В качестве целевой функции для оптимизации литейной технологии отливки корпуса нами использовалась группа расчетных критериев, отвечающих за локальный дефицит подпитки жидким металлом. Стратегия оптимизации заключалась в выявлении участков с недостаточным питанием и постепенное уменьшение их объема до полного удаления или, в случае невозможности такого варианта, перемещении их за счет создания и добавления технологических средств направленного затвердевания. В качестве таких средств использовались методы увеличения объема прибыли, изменение ее конфигурации и места соединения (расположения) с отливкой, назначение напусков и др.

Компьютерный анализ литейной технологии бесфланцевого корпуса выполнялся с использованием собственного программного обеспечения на основе метода конечных элементов (МКЭ), основанного на решении задачи нестационарной теплопроводности методом контрольного объема. Полученная информация о расчетных температурных полях для элементов металла и формы дает возможность сформировать поле продолжительности затвердевания (время полного затвердевания каждого элемента) и распределение локального параметра [18] степени направленности затвердевания в отливке. Расчет локального параметра направленности затвердевания для каждого элемента дискретизации отливки выполняется по следующей формуле (1/м):

$$G = \frac{(\tau_2 - \tau_1)}{\Delta l \cdot \tau_1}, \quad (1)$$

где τ_1 , τ_2 – продолжительность затвердевания металла соответственно в исследуемой точке отливки и в точке, отстоящей на расстояние Δl в направлении питания.

Величина локального параметра направленности затвердевания в таком виде отражает качество питания элементов отливки, и тогда распределение параметра направленности затвердевания можно

использовать в качестве целевой функции для геометрической и топологической оптимизации литейной технологии.

На **рис. 2** представлены результаты расчета расположения дефектов в отливке корпуса, вариант *a* – по критерию недостатка питания, вариант *b* – по критерию локального параметра направленности затвердевания G . Значения параметра $G[1/м]$ можно рассматривать как некоторые уровни, каждый из которых определяет работу питающих каналов. В простейшем случае можно выделить в отливке питаемые и питающие элементы. Серия собственных экспериментов [14, 15, 18], а также литературные данные по исследованию образования усадочной пористости позволили выявить условия, позволяющие достичь высокой плотности низколегированной стали в отливках с толщиной стенки в пределах 15–80 мм. Таким условием является следующее соотношение: $10 > G[1/м] > 1$, меньшие значения G приводят к локальному недостатку питания в отливке, а следовательно, к образованию усадочных пор и местному снижению механических свойств металла.

Исходная конструкция корпуса принимается как неизменяемая, топологической оптимизации подвергались только элементы, относящиеся к литейной технологии, – стояк и прибыли. При решении фиксируется расположение подводов металла к телу отливки, в качестве исходной выделяется информация о количестве стояков и прибылей, их позиция и геометрическая форма. Элементы сетки МКЭ помечаются отдельными маркерами, для участков, принадлежащих отливке, – Θ_C^i , литейной технологии (стояки, прибыли) – Θ_F^i и форме – Θ_M^i . Далее выполняется расчет затвердевания металла отливки в форме, результатом которого является расчетное распределение усадочной пористости как выбранной целевой функции для самой отливки (Π_C^i) и элементов технологии (Π_F^i). Прогнозный объем пористости в теле отливки (Π_C^i) может быть представлен как недостаток подпитки жидким металлом из области прибыли Θ_F^i . Таким образом, задача сводится к постепенному увеличению объема прибыли на известную величину – Π_C^i . Нарращивание прибыли производится в автоматическом режиме за несколько итераций, в каждой из которых элементы, принадлежащие форме Θ_M^i на границе с металлом прибыли, переводятся в прибыль Θ_F^i , при этом за каждую итерацию происходит увеличение объема прибыли примерно на

0,2–0,3%. Выбор элементов формы для переноса их в состав прибыли или стояка производится по следующему принципу: сначала выделяются наиболее разогретые элементы формы (рис. 3), граничащие с прибылью и близкие к термической оси стояка или прибыли, их добавление способствует увеличению гидростатического давления и объема питающего металла. Затем постепенно происходит расширение в горизонтальной плоскости, что позволяет увеличивать объем прибыли и время ее работы за счет того, что металл в ядре прибыли большее время остается в жидком и разогретом состоянии. После каждой итерации по наращиванию прибыли выполняется повторный расчет затвердевания отливки уже с измененной геометрией литейной технологии, пересчитываются объемы Θ_C^i , Θ_F^i , Π_C^i , Π_F^i . Критерием окончания процесса оптимизации литейной технологии является отсутствие изменений целевой функции Π_C^i , т.е. дальнейшее увеличение объема прибыли никак не влияет на уменьшение объема усадочной пористости в теле отливки. Такой подход не вызывает резкого изменения объема прибыли, каждая итерация направленно формирует и расширяет питающий канал отливки.

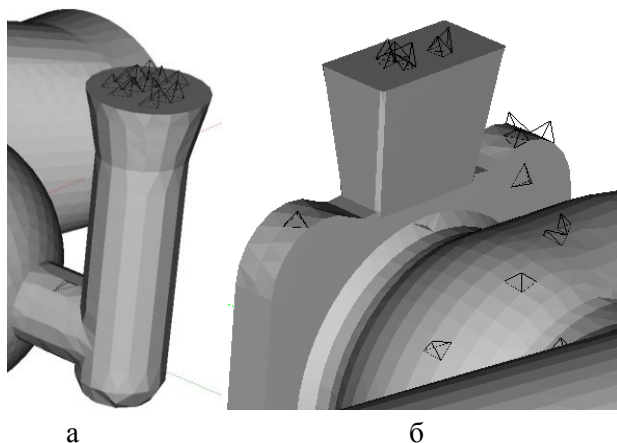


Рис. 3. Расчетные итерации по изменению литниково-питающей системы (ЛПС) (а – стояка, б – питающей прибыли)

В работах [19, 20] авторы предлагают назначать прибыли стандартного типоразмера исходя из предварительных расчетов недостатка объема питания и расположения локальных термических центров в исследуемых деталях. При этом одиночная прибыль или их группа должны располагаться непосредственно на вертикальной оси термических центров отливки, что, в свою очередь, позволяет минимизировать расстояние между питаемым и питающими элементами. Такой подход к оптимизации также является весьма перспективным, поскольку позволяет достаточно

быстро разработать литейную технологию в эскизном варианте для дальнейшей проработки.

Здесь наибольшей сложностью является необходимость многократного моделирования процесса затвердевания после каждой итерации по изменению геометрии ЛПС. Поскольку количество итераций составляет несколько десятков, то процесс оптимизации может занимать значительной время – несколько дней. Для этого была разработана специальная методика расчета, предусматривающая использование параллельных и распределенных вычислений на основе метода контрольного объема, более подробно она описана в работе [21]. Наиболее перспективным подходом для высокопроизводительных вычислений является применение технологии CUDA, которая может быть адаптирована и для решения задач нестационарной теплопроводности (моделирования затвердевания отливки в форме) по схеме, предложенной в работах [22, 23]. Каждая расчетная итерация приводит к изменению общего темпа затвердевания корпуса, что демонстрируется на рис. 4. Здесь видно, что постепенное увеличение объема прибыли приводит к расширению последней фазы кристаллизации (75–100% образования твердой фазы), где и необходима постоянная подпитка жидким металлом из прибыли. Всего за 25–35 итераций ЛПС была увеличена примерно на 15%, а ее эффективность (по сравнению с базовым вариантом) возросла на 50% (по объему элементов, имеющих недостаточное питание в отливке).

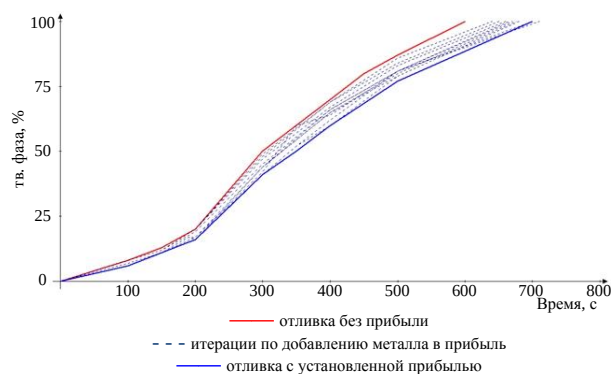


Рис. 4. Изменение темпа затвердевания при итерационной топологической оптимизации литейной технологии по увеличению объема прибыли

Следует отметить, что такой метод, хотя и является весьма эффективным, но в случае, когда начальное положение ЛПС назначено в участках, не имеющих непосредственного влияния на управление ходом кристаллизации, итерации по увеличению ЛПС не смогут дать ожидаемого результата.

Второй вариант схемы топологической опти-

мизации связан с созданием условий для направленного затвердевания металла отливки в форме и перераспределением структуры ЛПС с добавлением технологических припусков. Для этого по критерию продолжительности затвердевания определяются термические центры в отливке и в дальнейшем в качестве целевой функции используется локальный параметр направленности затвердевания. Вертикальные оси термических центров отливки используются как направляющие для постепенного наращивания прибылей, горизонтальные оси используются как точки подвода ЛПС, отличием здесь является то, что на каждой расчетной итерации добавление (перераспределение) элементов литейной технологии выполняется по нарастающей до 5% по объему, что и обеспечивает необходимые условия для направленного затвердевания. Такая методика сходна с работами [19, 20] и позволяет на самом начальном этапе определить площадь сечения в основании прибыли по размерам термических центров, но имеет преимущества, поскольку объем прибыли формируется поэтапно, а не из стандартных типоразмеров. На **рис. 5** представлен результат топологической оптимизации (автоматизированной разработки) литейной технологии по второму методу. Отличием здесь было использование двух разнесенных прибылей на центральном фланце, которые позволили более качественно запитать как сам фланец, так и радиусные переходы входного и выходного патрубков.

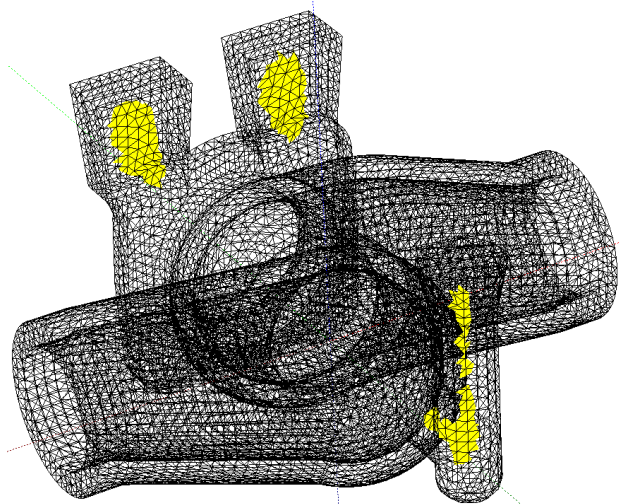


Рис. 5. Расчетная литейная технология для бесфланцевого корпуса судовой запорной арматуры

Исследование механических свойств литой стали экспериментальной отливки выполнялось путем разделения ее на темплеты с последующей вырезкой стандартных образцов для механических испытаний, при этом прочностные и пластические свойства металла были на достаточном уровне, без явных провалов. Бесфланцевая конструкция литого корпуса обладает достаточной жесткостью для реализации запорного узла по предложенной в работе [24] схеме уплотнения «металл»–«металл», что является необходимым условием для нормальной и длительной работы арматуры.

Выводы

В данной статье обсуждаются некоторые задачи, связанные с использованием методов топологической оптимизации при конструировании высоконагруженных корпусных деталей и при разработке их литейных технологий. Предложен способ автоматизированной оптимизации геометрических параметров и размеров прибылей для стальных фасонных отливок. Данный вид оптимизации может быть выполнен на предварительной стадии проектирования, когда ЛПС еще окончательно не выбрана или не определены ее геометрические параметры. Представленный метод был апробирован и может в дальнейшем развиваться как инструмент для проектирования технологий изготовления стальных отливок.

При выполнении работы использовалось программное обеспечение, разработанное автором и зарегистрированное в ФГБУ ФИПС:

Ольховик Е.О. Программа для ЭВМ – «Подготовка составной конечно-элементной модели для моделирования задачи нестационарной теплопроводности методом контрольного объема» №2014662705, зарегистрирована 05.12.2014г.

Ольховик Е.О. Программа для ЭВМ – «Моделирование технологического процесса затвердевания металла отливки в форме» №2014662447, зарегистрирована 01.12.2014г.

Ольховик Е.О. Программа для ЭВМ – «Моделирование дендритной кристаллизации сплава железо-углерод методом фазового поля» №2015613657, зарегистрирована 20.03.2015г.

В следующей статье будут приведены результаты непосредственного исследования механических свойств образцов литой стали, вырезанных из экспериментальных отливок корпуса судовой запорной арматуры для сравнения вариантов различных литейных технологий.

Список литературы

1. Анализ причин брака при производстве стальных корпусных отливок посредством СКМ ЛП LVM FLOW / Сушко Т.И., Леднев А.С., Пашнева Т.В., Руднева И.Г. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. № 1. С. 26–29.
2. Колокольцев В.М., Синицкий Е.В., Савинов А.С. Моделирование температурных полей при получении отливок // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. № 3 (51). С. 39–43.
3. Ольховик Е. О. Исследование влияния усадочной пористости и параметров структуры на изменение механических свойств в отливках ответственного назначения из углеродистой стали: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2005.
4. Филимонов И.Е., Гордич А.Г., Прокудин П.А. Моделирование напряженно-деформированного состояния тонкостенных корпусных деталей с учетом литейных дефектов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2011. № 31 (258). С. 44–48.
5. Deaton J. D., Grandhi R. V. A survey of structural and multidisciplinary continuum topology optimization: post 2000 // Structural and Multidisciplinary Optimization, 2014, vol. 49(1), pp. 1–38. Available at: <http://dx.doi.org/10.1007/s00158-013-0956-z>.
6. Allaire G., Jouve F., Michailidis G. Casting constraints in structural optimization via a level-set method // 10th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization. Orlando, United States, 2013.
7. Jain A. Design of an Aluminum Alloy Swingarm and its Weight minimization using Topology Optimization // SAE Technical Paper, 2015. Available at: <http://dx.doi.org/10.4271/2015-01-1356>.
8. Doctor Y.N., Patil B.T., Darekar A.M. Review of Optimization Aspects for Casting Processes // International Journal of Science and Research (IJSR), 2015, vol. 4(3), pp. 2364–2368.
9. Swapnil A.A., Dr. Jaju S.B. A Review on Optimization of Gating System for Reducing Defect // International Journal of Engineering Research and General Science, 2014, vol. 2(1), pp. 93–98.
10. Вольнов И.Н. Системы автоматизированного моделирования литейных процессов-состояние, проблемы, перспективы // Литейщик России. 2007. № 6. С. 14–17.
11. Компьютерное конструирование технологичных по питанию стальных отливок / Поляков С., Куцый О.Я., Коротченко А.Ю., Коровин В.М., Баст Ю. // Литейное производство. 2014. № 2. С. 16–20.
12. Проблемы моделирования литейных процессов / Десницкая Л.В., Ольховик Е.О., Пирайнен В.Ю., Глебов С.М., Семенова Ю.М., Матвеев И.А. // Литейное производство. 2010. № 8. С. 25–28.
13. Вдовин Д.С., Котиев Г.О. Топологическая оптимизация рычага подвески грузового автомобиля // Тракторы и сельхозмашины. 2014. № 3. С. 20–23.
14. Десницкий В.В., Ольховик Е.О. Разработка методов автоматизированного проектирования литейной технологии изготовления отливок // Заготовительные производства в машиностроении. 2006. № 4. С. 7–10.
15. Ольховик Е.О., Десницкий В.В. Разработка методов автоматизированного проектирования литейной технологии стальных отливок арматуры нефтегазопроводов // Изв. вузов. Черная металлургия. 2006. № 12. С. 40–43.
16. Ольховик Е.О., Десницкий В.В. Исследование влияния размерной точности отливки боковой рамы тележки грузового железнодорожного вагона на ее прочность // Вестник машиностроения. 2014. № 10. С. 47–49.
17. Ol'khovik E.O. Development process design with effects of technology quality // Applied Mechanics and Materials, 2015, vol. 770, pp. 419–423. Available at: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.770.419>.
18. Ol'khovik E. O. Study of the Effect of Shrinkage Porosity on Strength Low Carbon Cast Steel // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2015, vol. 91, pp. 012–022. Available at: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899x/91/1/012022>.
19. Tavakoli R., Davami P. Automatic optimal feeder design in steel casting process // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2008, vol. 197(9), pp. 921–932. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cma.2007.09.018>.
20. Tavakoli R., Davami P. Optimal riser design in sand casting process with evolutionary topology optimization // Structural and multidisciplinary optimization, 2009, vol. 38(2), pp. 205–214. Available at: <http://dx.doi.org/10.1007/s00158-008-0282-z>.
21. Ol'khovik E.O., Butsanets A.A., Ageeva A.A. Use of the distributed computing at the castings solidification simulation // International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS), 2015. Available at: <http://dx.doi.org/10.1109/meacs.2015.7414905>.
22. Klimeš L., Štětina J. A Rapid GPU-Based Heat Transfer and Solidification Model for Dynamic Computer Simulations of Continuous Steel Casting // Journal of Materials Processing Technology, 2015, vol. 226, pp. 1–14. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.06.016>.
23. Michalski G., Sczygiol N. Using CUDA architecture for the computer simulation of the casting solidification process // Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists, 2014, vol. 2, pp. 933–937.
24. Ольховик Е.О., Резник Ю.А. Разработка технологии лазерной сварки сильфонных сборок для судовой трубопроводной арматуры // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2014. № 3 (25). С. 119–122.

Материал поступил в редакцию 07.04.16.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-4-27-35

TOPOLOGICAL OPTIMIZATION IN THE DEVELOPMENT OF CASTING PROCESSES

Evgeniy O. Ol'khovik – Ph.D. (Eng.), Associate ProfessorAdmiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint-Petersburg, Russia. E-mail: olhovick@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9305-0784>**Vladimir V. Desnitskii** – D.Sc. (Eng.), Professor

Department of Casting Materials, Processes and Equipment, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia.

Abstract

Problem Statement: This article analyses the current state of optimization tasks in designing casting processes for the production of shaped steel castings intended for critical applications. The main areas of potential research include geometrical and topological optimization of casting technology with the help of finite element methods. The article also describes some basic approaches to the selection of objective function and a set of functions for optimization, which is necessary in order to obtain excellent mechanical properties in steel castings and to design technological castings with high resistance to external loads. **Objectives:** The cast body of a flangeless check valve designed for ship industry and for common industrial use was chosen as the object of this research. **Methods Applied:** The objective functions applied for the optimization included the local parameter of the direction of solidification and a set of calculated criteria responsible for the local deficiency of liquid metal feed. The methods developed are based on iterative simulation of the solidification process and the control volume method. A different geometry of ingot tops and the gating system was used for each iteration depending on the assigned objective function. A series of passes was performed, with each pass slightly changing the geometry of the part. The result of each new pass was compared with the previous one until the satisfactory result was achieved. The article describes the results of topological optimization done to the casting. **Practical Relevance:** The casting process was modified, which resulted in a new design ensuring a high-quality casting with no deterioration of the mechanical properties. The mechanical properties were tested with the help of samples. The calculations and the results of direct mechanical testing show that the flangeless cast body can offer a high performance and the required rigidity.

Keywords: Steel castings, topological optimization, geometrical optimization, shut-off valves, casting technology, life cycle.

References

1. Sushko T.I., Lednev A.S., Pashneva T.V., Rudneva I.G. Analysing the causes of failures in the manufacture of steel castings with the help of LVM Flow. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2012, no. 1, pp. 26–29.
2. Kolokoltsev V.M., Sinititskiy E.V., Savinov A.S. Modelling of temperature profiles when producing castings. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 3 (51), pp. 39–43.
3. Ol'khovik E.O. *Issledovaniye vliyaniya usadochnoy poristosti i parametrov struktury na izmeneniye mekhanicheskikh svoystv v otlivkakh otvetstvennogo naznacheniya iz uglerodistoy stali: avtoref. dis... kand. tekhn. nauk* [Studying the effect of shrinkage porosity and structure parameters on the mechanical properties of carbon steel castings intended for critical applications. Extended abstract of Ph.D. dissertation]. Saint-Peterburg, 2005.
4. Filimonov I.E., Gordich A.G., Prokudin P.A. Modeling of the stress-strain state of thin-walled body parts accounting for casting defects. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroyeniye* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Mechanical engineering]. 2011, no. 31 (258), pp. 44–48.
5. Deaton J.D., Grandhi, R.V. A survey of structural and multidisciplinary continuum topology optimization: post 2000. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2014, vol. 49(1), pp. 1–38. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s00158-013-0956-z>.
6. Allaire G., Jouve F., Michailidis G. Casting constraints in structural optimization via a level-set method. 10th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization. Orlando, United States, 2013.
7. Jain A. Design of an Aluminum Alloy Swingarm and its Weight minimization using Topology Optimization. SAE Technical Paper, 2015. URL: <http://dx.doi.org/10.4271/2015-01-1356>.
8. Doctor Y.N., Patil B.T., Darekar A.M. Review of Optimization Aspects for Casting Processes. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 2015, vol. 4(3), pp. 2364–2368.
9. Swapnil A.A., Dr. Jaju S.B. A Review on Optimization of Gating System for Reducing Defect. *International Journal of Engineering Research and General Science*, 2014, vol. 2(1), pp. 93–98.
10. Vol'nov I.N. Automated systems for modelling casting processes – current state, problems, prospects. *Liteyshchik Rossi* [Russian foundry worker]. 2007, no. 6, pp. 14–17.
11. Polyakov S., Kutsyi O.Ya., Korotchenko A.Yu., Korovin V.M., Bast Y. Computer-aided design of easily feedable steel castings. *Liteynoye proizvodstvo* [Foundry]. 2014, no. 2, pp. 16–20.
12. Desnitskaya L.V., Ol'khovik E.O., Pirainen V.Yu., Glebov S.M., Semenova Yu.M., Matveev I.A. The problems of casting process simulation. *Liteynoye proizvodstvo* [Foundry]. 2010, no. 8, pp. 25–28.
13. Vdovin D.S., Kotiev G.O. Topological optimization of a truck suspension level. *Traktory i sel'khoz mashiny* [Tractors and agricultural machinery]. 2014, no. 3, pp. 20–23.
14. Desnitskiy V.V., Ol'khovik E.O. Developing methods for computer-aided design of casting processes. *Zagotovitel'nyye proizvodstva v mashinostroyenii* [Blank production in machine industry]. 2006, no. 4, pp. 7–10.
15. Ol'khovik E.O., Desnitskiy V.V. Developing methods for computer-aided design of the casting process for fittings used in oil and gas pipelines. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya* [Proceedings of Russian Universities. Ferrous Metallurgy]. 2006, no. 12, pp. 40–43.
16. Ol'khovik E.O., Desnitskiy V.V. Studying the relationship between the dimensional accuracy and the strength of railway bogie solebar castings. *Vestnik mashinostroyeniya* [Russian Engineering Research]. 2014, no. 10, pp. 47–49.
17. Ol'khovik E.O. Development process design with effects of technology quality. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 770, pp. 419–423. URL: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.770.419>.
18. Ol'khovik E.O. Study of the Effect of Shrinkage Porosity on Strength Low Carbon Cast Steel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015, Vol. 91, pp. 12–22. Available at:

- http://dx.doi.org/10.1088/1757-899x/91/1/012022.
19. Tavakoli R., Davami P. Automatic optimal feeder design in steel casting process. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2008, vol. 197(9), pp. 921–932. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cma.2007.09.018>.
20. Tavakoli R., Davami P. Optimal riser design in sand casting process with evolutionary topology optimization. *Structural and multidisciplinary optimization*, 2009, vol. 38(2), pp. 205–214. Available at: <http://dx.doi.org/10.1007/s00158-008-0282-z>.
21. Ol'khovik E.O., Butsanets A.A., Ageeva A.A. Use of the distributed computing at the castings solidification simulation. *International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS)*, 2015. Available at: <http://dx.doi.org/10.1109/meacs.2015.7414905>.
22. Klimeš L., Štětina J. A Rapid GPU-Based Heat Transfer and Solidification Model for Dynamic Computer Simulations of Continuous Steel Casting. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, vol. 226, pp. 1–14. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.06.016>.
23. Michalski G., Sczygiol N. Using CUDA architecture for the computer simulation of the casting solidification process. *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists*, 2014, vol. 2, pp. 933–937.
24. Ol'khovik E.O., Reznik Yu.A. The development of a laser welding technology for bellows used in ship pipeline fittings. *Vestnik Gosudarstvennogo Universiteta Morskogo i Rechnogo Flota Imeni Admirala S.O. Makarova* [Bulletin of Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping]. 2014, no. 3 (25), pp. 119–122.

Received 07/04/16

Ольховик Е.О., Десницкий В.В. Применение методов топологической оптимизации при разработке литейной технологии // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т.14. №4. С. 27–35. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-4-27-35

Ol'khovik E.O., Desnitskii V.V. Topological optimization in the development of casting processes. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 4, pp. 27–35. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-4-27-35

О ПРИМЕНЕНИИ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ В ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Илларионов И.Е., Стрельников И.А.

Чувашский государственный университет им. И.Н.Ульянова, Чебоксары, Россия

Аннотация

Постановка задачи (актуальность работы): в работе рассмотрена актуальная задача утилизации техногенных отходов промышленных производств. Показано, что использование промышленных отходов, в ряде случаев, значительно уменьшает стоимость конечной продукции. Определено положительное влияние использования техногенных отходов на качество некоторых видов материалов, используемых в литейной промышленности.

Цель работы: привлечь внимание научного сообщества к экологическим проблемам, создаваемым техническими предприятиями, и показать положительный эффект от применения отходов техногенного характера в получении более качественных формовочных материалов для литейного производства, снижающих конечную себестоимость выпускаемой продукции. **Используемые методы:** в работе применяются стандартные методы исследования физических и механических свойств формовочных материалов, используемых для литейного производства. **Новизна:** к элементам новизны относятся усовершенствованные составы формовочных смесей, служащих для изготовления литейных форм, стержней и теплоизоляционных оболочек, в состав которых входят экструзионный крахмальный реагент, трепел, зола-унос ТЭС, керамзитовая пыль, шлаки цветной и черной металлургии и др., являющиеся техногенными отходами различных производств. **Практическая значимость:** показана практическая ценность использования отходов промышленных предприятий в литейном производстве, заключающаяся в утилизации части техногенных отходов, увеличении качества материалов, используемых в литейной промышленности, снижении себестоимости выпускаемых отливок и повышении их качества. Определено, что использование отходов при разработке новых материалов перспективно, работа в этом направлении вносит существенный вклад в развитие экономики страны.

Ключевые слова: технология, техногенные отходы, литейные формы, стержни, компоненты, составы.

Введение

В настоящее время наиболее актуальна выработка системных технологий обращения с техногенными отходами, т.к. сложившаяся в Российской Федерации ситуация в области экологической безопасности и обращения с отходами ведет к опасному загрязнению окружающей природной среды и создает реальную экономическую проблему. В то же время наша страна обладает значительными ресурсами вторичного сырья, которые можно характеризовать как возобновляемые сырьевые, материальные и топливно-энергетические ресурсы. По экспертным оценкам объемы накопления отходов в промышленности составляют около 80 млрд т, объемы образования отходов – около 3 млрд т в год (при годовом объеме потребления вторичных сырьевых ресурсов промышленностью менее 1 млрд т). Средний уровень использования отходов в качестве вторичных ресурсов состав-

ляет около одной трети. Массовое накопление на промышленных предприятиях и в других сферах отходов производства и потребления говорит не только о несовершенстве технологий производства и нерациональном использовании отходов в качестве вторичных ресурсов, но и создании экологических проблем [1]. Основные пути решения проблем экологизации экономики и формирования устойчивого типа экономического развития следующие: структурная перестройка экономики, изменение сырьевой ориентации экспорта; разработка и применение природоохраняющих или безотходных технологий, замкнутых циклов производства, глубоко продуманное, наиболее рациональное размещение «грязных» производств; прямые природоохранные мероприятия. Наиболее рациональным направлением утилизации промышленных отходов является их использование как техногенного сырья при получении различного вида продукции и, прежде всего, строительного и металлургического назначения. В проблеме рациональной утилизации промыш-

ленных отходов в единый узел сплелись вопросы охраны окружающей среды и ресурсосбережения. Решение проблемы ресурсосбережения в различных отраслях возможно при комплексном использовании технических, организационных, экономических факторов и применении современных технологических процессов. Использование промышленных отходов обеспечивает производство дешёвого и часто уже подготовленного сырья; приводит к экономии капитальных вложений, предназначенных для строительства предприятий, добывающих и перерабатывающих сырьё, повышению уровня их рентабельности; высвобождению значительных площадей земельных угодий и снижению степени загрязнения окружающей среды. Повышение уровня использования промышленных отходов является важнейшей производственной задачей. На основе применения отходов промышленности возможно развитие производства не только традиционных, но и новых эффективных строительных и других материалов. Новые материалы обладают комплексом улучшенных технических и технологических свойств и в то же время характеризуются наименьшей ресурсоёмкостью как в процессе производства, так и при применении [2, 3]. Масштабы применения промышленных отходов в производстве строительных материалов в РФ неуклонно увеличиваются. Некоторые виды отходов, как, например, доменные гранулированные шлаки, пользуются достаточным спросом в настоящее время и используются полностью. Передовые металлургические предприятия переходят практически на безотвальную работу. В промышленности накоплен положительный опыт создания комбинированных производств. Это производство глинозёма, содопродуктов и портландцемента на основе нефелиновых шламов и известняков, легированного чугуна и глинозёмистого цемента и др. Значительно меньше, чем доменные, используются пока сталеплавильные шлаки. Объём их составляет около 65%. Незначителен уровень применения шлаков цветной металлургии. Утилизируется лишь около 15% объёма золошлаковых отходов энергетической промышленности, которые наряду с металлургическими шлаками можно отнести к наиболее значительным сырьевым ресурсам для промышленности строительных материалов. Неудовлетворителен пока уровень использования отходов деревообрабатывающей, химической,

нерудной и ряда других отраслей промышленности. Развитие и совершенствование производства современных материалов и продукции, повышение их экономической эффективности на данном этапе в значительной степени будут определяться рациональностью использования сырьевых ресурсов, полнотой вовлечения в производство отходов различных отраслей промышленности. При этом в основе безотходных производств лежит идея комплексного использования сырья. В зависимости от физико-химических свойств отходов, а также от их количества применяют различные методы обезвреживания и переработки: механические, биологические, химические, сорбционные, термические, а также комбинированные. На ряде металлургических предприятий освоена технология регенерации металлов путём переработки шлаков, шламов и др. Каждая тонна алюминия, извлечённого из отходов, обходится в 10 раз, меди – в 6, цинка – в 3,5 и свинца – в 2,5 раза дешевле, чем те же металлы, выплавленные обычным способом – из рудного сырья [3, 4]. Эффективное решение проблемы промышленных отходов – это внедрение безотходной технологии. Безотходные производства основаны на принципиальном изменении технологических процессов, разработке систем с замкнутым циклом, обеспечивающих многократное использование продуктов, и комплексном использовании сырья. При комплексном использовании сырьевых материалов промышленные отходы или побочные продукты одних производств являются исходными материалами других. Важность комплексного использования сырьевых материалов можно рассматривать в нескольких аспектах. Во-первых, утилизация отходов позволяет решать задачи по охране окружающей среды, освобождать ценные земельные угодья, отчуждаемые под отвалы и шламохранилища, устранять вредные выбросы в окружающую среду. Во-вторых, отходы промышленности в значительной степени покрывают потребность ряда перерабатывающих отраслей в сырье, причём во многих случаях высококачественном, подвергнутом в процессе производства первичной технологической обработке (измельчению, обжигу и т.д.). В-третьих, при комплексном использовании сырья снижаются удельные капитальные затраты на единицу продукции и уменьшается срок их окупаемости, снижаются также непроекти-

тельные расходы основного производства, связанные со складированием отходов, строительством и эксплуатацией хранилищ для них; уменьшаются затраты, расход теплоты и электроэнергии на новую продукцию за счёт технологической подготовленности отходов; увеличивается производительность оборудования. К настоящему времени, учитывая эффективность применения многих минеральных и органических отходов в качестве сырьевых ресурсов, отходами их можно считать лишь по отношению к целевой продукции предприятий [2].

Технические и технологические разработки

В различных отраслях промышленности образуется значительное количество побочных продуктов производственных процессов – материалов техногенного происхождения – отходов, содержащих химические соединения или их комплексы, введение которых в различные смеси (формовочные, стержневые, теплоизоляционные) литейного производства на этапе производства формы, стержней или теплоизоляционных оболочек позволяет достичь результатов, по качеству сопоставимых со стандартными требованиями, а иногда и превышающими их. Например, некоторые техногенные отходы, такие как шламы гальванических производств, золы и шлаки теплоэлектростанций (ТЭС), шлаки цветной и черной металлургии, отходы мукомольного и крахмального производств, в частности экструзионный крахмальный реагент, являются ценным сырьем для получения различной продукции. Кроме того, такие отходы, по опытным данным, могут быть использованы в литейном производстве в составах для приготовления различных смесей.

Авторами [6] предлагается использовать состав для изготовления литейных форм, включающий гипс, кварцевый песок, отличающийся тем, что он дополнительно содержит осадок после нейтрализации гальванического производства, при следующем соотношении компонентов, мас. %:

гипс	30–40
осадок после нейтрализации гальванического производства	20–40
кварцевый песок	остальное

Введение осадка после нейтрализации гальванического производства в указанных количествах позволяет получать формовочные смеси с

оптимальными свойствами, обеспечивающими изготовление качественных литейных форм [5].

Предлагается также использовать смесь для изготовления литейных форм и стержней, отверждаемых тепловой сушкой, содержащую формовочную глину, огнеупорный наполнитель, связующее и воду, отличающуюся тем, что в качестве связующего смесь содержит экструзионный крахмальный реагент при следующем соотношении ингредиентов, мас. %:

формовочная глина	4–5
экструзионный крахмальный реагент	1–5
вода	2–4
огнеупорный наполнитель	остальное

Таким образом, введение реагента в указанных количествах позволяет получать формовочные смеси с оптимальными свойствами, обеспечивающими изготовление качественных литейных форм. При этом уменьшается стоимость формовочных смесей за счет низкой стоимости реагента, являющегося отходом мукомольного и крахмального производств. Экструзионный крахмальный реагент является готовым материалом, включающим в себя отходы производства. Дальнейшей дополнительной обработке (помолу и просеиванию) данный реагент перед употреблением в формовочной смеси не подвергается. Введение в состав экструзионного крахмального реагента, который представляет собой тонкодисперсное вещество с весьма малым размером частиц, позволяет увеличить прочностные характеристики смеси. Оптимальное содержание реагента в смеси находится в пределах 1–5% [6].

В настоящее время основным потребителем доменных шлаков является цементная промышленность. Для цементной промышленности также перспективными являются некоторые другие виды металлургических шлаков: феррохромовый, позволяющий получать цветной портландцементный клинкер; никелевые и медные, применяемые в качестве железистого компонента сырьевой цементной смеси и активной минеральной добавки: шлаки алюмотермического производства ферросплавов и вторичной переплавки алюминия и его сплавов – как сырьё для производства глинозёмистого цемента и сверхбыстротвердеющего портландцемента; сталерафинировочные шлаки, пригодные для получения расширяющихся цементов. Для получения шлаковых вяжущих автоклавного твердения возможно применение как гранулированных, так и медленно охлаждённых сталеплавильных шла-

ков и шлаков цветной металлургии. На металлургических заводах образуется значительное количество различных железосодержащих пылей и шламов. Они с успехом могут применяться в качестве железистой корректирующей добавки в производстве портландцементного клинкера. Железосодержащие добавки используются также при получении керамзита для улучшения вспучивания и спекания глинистого сырья. Кроме того, предлагается использовать теплоизоляционную смесь для утепления прибылей отливок, содержащую металлофосфатное связующее и отход ваграночного производства чугуна, отличающуюся тем, что она дополнительно содержит трепел, а в качестве фосфатного связующего – алюмохромфосфатное связующее при следующем соотношении компонентов, мас. %:

алюмохромфосфатное связующее	8–12
трепел	5–10
отход ваграночного производства чугуна	остальное

Полученная смесь для утепления прибылей отливок обладает повышенной формуемостью и улучшенными физико-механическими свойствами, в результате улучшается охрана окружающей среды за счёт утилизации отхода ваграночного производства и снижается себестоимость за счёт использования промышленных отходов и природного трепела, утилизируются отходы производства, решается экологическая проблема [7].

Подобранная совокупность компонентов и их количественное соотношение обеспечивает увеличение теплоизолирующего эффекта смеси при достаточных физико-механических свойствах, необходимых для изготовления теплоизоляционных оболочек и вставок.

К отходам топливно-энергетической промышленности относятся продукты, получаемые в виде отходов при добыче, обогащении и сжигании твёрдого топлива. Эту группу отходов разделяют по источнику образования, виду топлива, числу пластичности минеральной части отходов, содержанию горючей части, зерновому составу, химико-минералогическому составу, степени плавкости, интервалу размягчения, степени вспучиваемости. При сжигании твёрдых видов топлива в топках тепловых электростанций (ТЭС) образуются зола в виде пылевидных остатков и кусковый шлак, а также золошлаковые смеси. Они являются продуктами высокотемпературной обработки минеральной частицы топлива. Зола-унос представляет собой тонкодисперсный материал, состоящий в ос-

новном из частиц размером 5–100 мкм. Её химико-минералогический состав соответствует составу минералогической части сжигаемого топлива. Авторами [8] предлагается использовать золу-унос ТЭС в составе смесей для изготовления литейных форм и стержней, отверждаемых тепловой сушкой. Смесь содержит, мас. %: формовочную глину – 2,5–3,5; алюмохромфосфатную связку – 3,0–4,0; воду – до 1,0%; золу-унос ТЭС – 0,5–1,5; огнеупорный наполнитель – остальное. Смесь готовят путём сухого перемешивания огнеупорного наполнителя (кварцевого песка), формовочной глины и золы-уноса ТЭС в течение 2–3 мин. Далее вводят воду и перемешивают 5–6 мин, после чего вводят алюмохромфосфатное связующее (АХФС) и перемешивают ещё 3–4 мин. Итого общее время перемешивания – не более 13 мин. Образцы сушат при 180–200°C в течение 20–30 мин. Вода в количестве 0,4–0,6% необходима для повышения адгезии глины к огнеупорному наполнителю. При содержании воды менее 0,4% увеличивается осыпаемость смеси, а при содержании более 0,6% снижается прочность в сыром состоянии. Добавка золы-уноса ТЭС в количестве 0,5–1,5% снижает прилипаемость смеси к оснастке, повышает прочность в высушенном состоянии, уменьшает осыпаемость. При более низком содержании золы-уноса не достигается необходимое значение прилипаемости, а при более высоком не наблюдается дальнейшее улучшение свойств смеси. Зола-унос ТЭС представляет собой тонкодисперсное вещество с весьма малым размером частиц, что позволяет использовать её без помола. Таким образом, использование данного изобретения позволит улучшить условия труда, повысить прочность стержней и форм, газопроницаемость, снизить газотворность, а также расширить арсенал средств данного назначения.

Предлагается также использовать смесь, содержащую в составе керамзитовую пыль для изготовления литейных форм и стержней, отверждаемых тепловой сушкой. Смесь содержит, масс. %: формовочную глину – 3,0–3,5; крахмалит – 0,3–0,5; воду – 0,8–1,0; алюмохромфосфатное связующее (АХФС) – 3,0–4,0; керамзитовую пыль – 0,5–1,0; огнеупорный наполнитель – остальное [9].

Изобретение относится к литейному производству, а именно к составам смесей для изготовления литейных форм и стержней, отверждаемых тепловой сушкой. Крахмалит представляет собой продукт на основе кукурузного крахмала, получаемый при термообработке крахмалобелковой суспензии на вальцовой сушке. Цель

изобретения – улучшение качества форм и стержней за счёт повышения их прочности в сухом состоянии, увеличения газопроницаемости. Предлагаемую смесь готовят путём сухого перемешивания огнеупорного наполнителя, формовочной глины и керамзитовой пыли в течение 2–3 мин. Одновременно готовится суспензия воды и крахмалита. Далее вводят суспензию в сухую смесь и перемешивают 5–6 мин, после чего вводят АХФС и перемешивают ещё 3–4 мин. Общее время перемешивания не более 13 мин. Образцы сушат при 180–200°C в течение 10–20 мин. Керамзитовая пыль – пылевидный отход керамзитового производства, имеет следующий химический состав, мас. %: оксид кремния – 48–80; оксид алюминия – 7–27; оксиды железа – 0,5–13,5; оксид кальция – 0,5–20,0; оксид магния – 0,3–12,0; оксиды калия и натрия – 0,5–7,5. Керамзитовая пыль в пределах 0,5–1,0 обеспечивает интенсивное объёмное твердение, ускоряет сушку, препятствует прилипаемости смеси к оснастке. При более низком содержании керамзитовой пыли не достигается значение интенсификации твердения, прилипаемости и прочности в высушенном состоянии, а при более высоком – увеличивается осыпаемость. Формовочная глина в количестве 3,0–3,5 мас.% обеспечивает сырую прочность смеси. При содержании глины ниже 3 мас.% не обеспечивается требуемая прочность на сжатие в сыром состоянии, а при содержании свыше 3,5 мас.% возрастает осыпаемость смеси. Вода в количестве 0,8–1,0 мас.% необходима для повышения адгезии глины к огнеупорному наполнителю. При содержании воды менее 0,8 мас.% увеличивается осыпаемость смеси, а при содержании свыше 1 мас.% снижается прочность в сыром состоянии. Использование предлагаемого изобретения позволит улучшить условия труда, повысить прочность стержней и форм, газопроницаемость, снизить осыпаемость, а также расширить арсенал средств данного назначения и утилизировать отходы керамзитового производства.

Заключение

Перед современным литейным производством ставятся задачи по снижению себестоимости, повышению качества и товарного вида отливок, а также по повышению экологической безопасности производства. Решение этих задач во многом связано с разработкой новых, более

технологичных составов формовочных и других смесей, а также с оптимизацией существующих способов их приготовления и упрочнения.

Комплексное использование сырья и техногенных отходов производства даёт возможность увеличить выпуск многих видов продукции на 25–30%, снизить ее себестоимость в несколько раз.

Проблемы утилизации отходов промышленных производств становятся всё более актуальными. Практика показывает, что основная масса всех образующихся технологических отходов не может быть переработана (утилизирована) на тех предприятиях, где данные отходы образуются. Распространение получает практика использования отходов в смежных отраслях. При этом особая роль при решении данной проблемы отводится литейно-металлургическому производству – основной заготовительной базе машиностроения [10].

Список литературы

1. Илларионов И.Е., Жупавлёв Ю.А., Стрельников И.А. Экологические проблемы металлургического производства: конспект лекций. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2015. 88 с.
2. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Строительные материалы из отходов промышленности. Ростов н/Д.: Феникс, 2007. 368 с.
3. Основы промэкологии, теории процессов и аппаратов очистки технологических и аспирационных газов литейно – металлургических и смежных производств: монография. Ч. 1 / И.Е. Илларионов, И.О. Леушин, В.А. Ульянов, В.Н. Гуцин, В.В. Новоселов; под общ. ред. Илларионова И.Е. Чебоксары; Н. Новгород: НГТУ, 2003. 196 с.
4. Основы промэкологии, теории процессов и аппаратов очистки технологических и аспирационных газов литейно-металлургических и смежных производств: монография. Ч. 2 / И.Е. Илларионов, И.О. Леушин, В.А. Ульянов, В.Н. Гуцин, В.В. Новоселов; под общ. ред. Илларионова И.Е. Чебоксары; Н. Новгород: НГТУ, 2003. 216 с.
5. Пат. 2187404 Российская Федерация. Состав для изготовления литейных форм / Илларионов И.Е., Стрельников И.А., Никитин С.И. Бюл. №23, 2002.
6. Пат. 2267376 Российская Федерация. Состав для изготовления литейных форм и стержней / Стрельников И.А., Евлампиев А.А., Иванова Л.А. Бюл. №01, 2006.
7. Пат. 2356688 Российская Федерация. Теплоизоляционная смесь для утепления прибылей отливок / Илларионов И.Е., Стрельников И.А., Петрова Н.В., Журавлев А.Ф. Бюл. №15, 2009.
8. Пат. 2033880 Российская Федерация. Смесь для изготовления литейных форм и стержней / Илларионов И.Е., Стрельников И.А.
9. Пат. 2026766 Российская Федерация. Смесь для изготовления литейных форм и стержней, отверждаемых тепловой сушкой / Илларионов И.Е., Стрельников И.А.
10. Шлам селитровых ванн термических цехов – перспективный материал для литейно-металлургического производства / А.Н. Грачёв, О.С. Кошелев, И.О. Леушин, Л.И. Леушина, К.А. Маслов // Заготовительные производства в машиностроении. 2013. №10. С. 6–8.

Материал поступил в редакцию 27.10.16.

ON THE APPLICATION OF INDUSTRIAL WASTE IN FOUNDRY INDUSTRY

Ilya E. Illarionov – D.Sc. (Eng.), Professor, Academician of RANS, Distinguished Scientist of the Russian Federation, Distinguished Scientist of the Chuvash Republic
Ulyanov Chuvash State University, Cheboksary, Russia.

Igor A. Strelnikov – Ph.D. (Eng.), Associate Professor
Ulyanov Chuvash State University, Cheboksary, Russia.

Abstract

Problem Statement (Relevance): This paper is concerned with an urgent problem of industrial waste utilization. The authors show that in some cases the utilization of industrial waste results in a considerably reduced final product cost. It was found that the application of industrial waste can have a positive effect on the quality of some of the materials used in the foundry industry. **Objectives:** The objective is to draw the attention of the academic community to the environmental problems caused by industrial sites and to demonstrate that the application of industrial waste can improve the quality of moulding materials applied in foundry industry while reducing the cost of the final product. **Methods applied:** This research is based on the standard methods of analyzing the physical and mechanical properties of moulding materials used in foundry industry. **Originality:** The originality of this research includes enhanced chemical compositions of moulding sand mixtures used to produce foundry moulds, cores and heat insulating covers, which include extrusion starchy agent, tripoli powder, flue ash from heat power-stations, haydite dust, slag from non-ferrous and ferrous metallurgy etc., all of which are the types of industrial waste. **Practical Relevance:** The authors show what practical value the industrial waste can have in the foundry industry. This includes a partial utilization of industrial waste, an improved quality of the foundry materials, reduced casting costs and an enhanced quality of castings. It was established that the use of waste products has a great potential in the development of new materials and that further research in this area can boost the national economy.

Keywords: Technology, industrial waste, moulds, cores, components, compositions.

References

1. Illarionov I.E., Zhuravlev Yu.A., Strelnikov I.A. Environmental problems of steel industry: lecture notes. Cheboksary: Publishing House of the Chuvash University Press, 2015, 88 p.
2. Dvorkin L.I., Dvorkin O.L. Construction materials made from industrial waste. Rostov-on-Don: Feniks, 2007, 368 p.
3. Illarionov I.E., Leushin I.O., Ulyanov V.A., Gushchin V.N., Novoselov V.V. Fundamentals of industrial ecology, the theory of processes and gas purification devices installed in foundries and at related sites: monograph, part 1. Ed. by I.E. Illarionov. Cheboksary – Nizhny Novgorod: Novosibirsk State Technical University, 2003, 196 p.
4. Illarionov I.E., Leushin I.O., Ulyanov V.A., Gushchin V.N., Novoselov V.V. Fundamentals of industrial ecology, the theory of processes and gas purification devices installed in foundries and at related sites: monograph, part 2. Ed. by I.E. Illarionov. Cheboksary – Nizhny Novgorod: Novosibirsk State Technical University, 2003, 216 p.
5. Illarionov I.E., Strelnikov I.A., Nikitin S.I. A composition for the production of casting moulds. Patent RF, no. 2187404, 2002.
6. Strelnikov I.A., Evlampiev A.A., Ivanova L.A. A composition for the production of casting moulds and cores. Patent RF, no. 2267376, 2006.
7. Illarionov I.E., Strelnikov I.A., Petrova N.V., Zhuravlev A.F. Heat-insulating mixture for the insulation of the head of castings. Patent RF, no. 2356688, 2009.
8. Illarionov I.E., Strelnikov I.A. A mixture used in the production of casting moulds and cores. Patent RF, no. 2033880, 1995.
9. Illarionov I.E., Strelnikov I.A. A mixture used in the production of casting moulds and air-blown cores. Patent RF, no. 2026766, 1995.
10. Grachev A.N., Koshelev O.S., Leushin I.O., Leushina L.I., Maslov K.A. Nitro bath slag found in heat treatment lines – Novel material for foundry industry. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii* [Blank production in machine building industry]. 2013, no. 10, pp. 6–8.

Received 27/10/16

Илларионов И.Е., Стрельников И.А. О применении техногенных отходов в литейном производстве // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т.14. №4. С. 36–41. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-4-36-41

Illarionov I.E., Strelnikov I.A. On the application of industrial waste in foundry industry. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 4, pp. 36–41. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-4-36-41

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.7.01

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-4-42-49

КРИТЕРИЙ ПЛАСТИЧНОСТИ АНИЗОТРОПНОЙ СРЕДЫ
С УЧЕТОМ КРИСТАЛЛОГРАФИИ СТРУКТУРЫ
И ЕГО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКАЕрисов Я.А.¹, Гречников Ф.В.^{1,2}, Сурудин С.В.¹¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева (Самарский университет), Самара, Россия² Самарский научный центр Российской академии наук (СамНЦ РАН), Самара, Россия**Аннотация**

Постановка задачи (актуальность работы): современные критерии пластичности позволяют с той или иной степенью точности проводить расчеты поведения анизотропных материалов при пластическом деформировании. Однако они не учитывают физических основ возникновения анизотропии свойств – кристаллического строения материала и текстурообразования при больших пластических деформациях. Следовательно, на основе данных критериев невозможно решить обратную задачу, т.е., исходя из требований пластического формообразования заготовок, определить наиболее эффективную кристаллографическую ориентацию структуры, которую необходимо сформировать в процессе производства полуфабрикатов. **Цель работы:** разработать критерий пластичности и определяющие соотношения теории пластичности для ортотропного материала с учетом констант кристаллической решетки и параметров преимущественной кристаллографической ориентации структуры для общего случая напряженного состояния. **Используемые методы:** критерий пластичности выведен на основе удельной потенциальной энергии формообразования с использованием элементов тензорного исчисления и теории инвариантов. Правильность основных соотношений разработанного варианта теории пластичности анизотропных сред подтверждена экспериментально путем сравнения кривых упрочнения, полученных при испытании на растяжение образцов, вырезанных вдоль и поперек направления прокатки, и расчетным путем. **Новизна:** разработаны основные уравнения теории пластичности ортотропной среды, учитывающие в явном виде кристаллографическую природу анизотропии свойств. **Результаты:** установлено, что для определения зависимостей между интенсивностью напряжений и деформаций в различных направлениях достаточно построить кривую упрочнения в одном из направлений и, зная ориентационные факторы текстуры и параметры кристаллической решетки, получить функциональные связи в других направлениях. При этом погрешность расчетов составляет не более 2–3%. **Практическая значимость:** предложенный вариант теории пластичности позволяет проектировать состав компонент текстуры материала, обеспечивающий повышение технологических и эксплуатационных характеристик изделия.

Ключевые слова: анизотропия, критерий пластичности, кристаллическая решетка, текстура, кристаллографическая ориентировка, кривая упрочнения, испытание на растяжение.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №16-38-00495.

Введение

Одной из характеристик, присущих большинству металлов, является анизотропия их свойств, обусловленная кристаллическим строением вещества и последующим его текстурообразованием при больших пластических деформациях [1]. Однако при анализе и расчетах про-

цессов обработки металлов давлением в настоящее время в качестве одной из основных гипотез все еще используется допущение об изотропности деформируемого тела. Эта гипотеза хотя и упрощает решение целого ряда задач обработки металлов давлением, но не отвечает, в сущности, реальным условиям деформирования.

Отказ от допущения изотропности среды позволяет обобщить теорию расчетов пластиче-

ского формоизменения и получить новые возможности эффективного использования направленности свойств материала [2–5]. Несмотря на то, что в последнее время теоретическим и экспериментальным исследованиям в области пластического деформирования анизотропных тел уделяется все большее внимание [6], все же имеется ряд нерешенных вопросов. Эти вопросы связаны, прежде всего, с дальнейшей разработкой положений теории пластичности анизотропных сред в форме, пригодной для инженерного применения в технологических расчетах.

Р. Мизесом впервые был предложен вариант критерия пластичности при произвольной анизотропии, который представляет собой квадратичную функцию от напряжений, не зависящую от всестороннего равномерного давления [7]. Однако физический смысл входящих в данную функцию коэффициентов был частично раскрыт только Р. Хиллом, который предложил для ортотропного материала определять их через пределы текучести при линейном растяжении вдоль главных осей анизотропии [8]. Проверка данного критерия пластичности подтвердила его применимость в основном для описания поведения сталей [9], поэтому для других материалов Р. Хилл предложил неквадратичный критерий пластичности [10]. Однако данный критерий не учитывает касательных напряжений и поэтому применим только для случая, когда направление главных нормальных напряжений совпадает с осями анизотропии. Данный недостаток был устранен Ф. Барлатом, который для случая плоского напряженного состояния предложил обобщенный критерий, учитывающий касательные напряжения [11].

Дальнейшее развитие критерия Р. Мизеса получил в работах [12, 13], в которых для случая общего напряженного состояния входящие в него коэффициенты выражены через коэффициенты поперечной деформации (аналогичные коэффициентам Пуассона только в пластической области), исходя из равенства инвариантов материального тензора изотропного и анизотропного тела.

Также Ф. Барлатом для произвольного напряженного состояния на основе изотропного критерия был разработан критерий пластичности, в котором тензор напряжений выражается через координаты, параллельные осями анизотропии [14]. Обобщением данного критерия является условие пластичности, полученное преобразованием тензора напряжений при помощи

весовых коэффициентов [15].

Данный подход аналогичен линейному преобразованию тензора (или девиатора) напряжений, которое позволяет использовать любой изотропный критерий пластичности для описания поведения ортотропного материала. При этом анизотропия свойств описывается компонентами материального тензора 4-го порядка. Двойным линейным преобразованием был получен анизотропный критерий пластичности для плоского напряженного состояния материалов, пределы текучести на сжатие и растяжение которых одинаковы [16]. Линейным преобразованием были получены и другие критерии пластичности для случая общего напряженного состояния [17, 18].

Другой подход, предложенный в работах [19, 20], заключается в преобразовании изотропного критерия пластичности к ортотропному заменой входящих в него инвариантов девиатора напряжений на аналогичные обобщенные для анизотропной среды инварианты, выведенные на основании теории представлений тензорной функции.

В общем современные критерии пластичности в отличие от более ранних, выведенных для описания поведения практически любого металла, позволяют учесть особенности конкретных групп материалов. При этом их высокая точность достигается за счет большого количества коэффициентов анизотропии (до 18), для определения которых требуется проведение многочисленных механических испытаний при различных условиях нагружения [21].

Кроме того, хотя используемые коэффициенты и характеризуют анизотропию деформационных характеристик материала, они не учитывают физических основ возникновения анизотропии свойств, т.е. кристаллографической ориентации структуры. А значит – не позволяют решить обратную задачу, т.е., исходя из требований пластического формообразования заготовок или особенностей эксплуатации изделий, определить наиболее эффективный состав компонент текстуры, который необходимо сформировать в процессе производства в конструкционных материалах.

В данной работе на основе энергетического подхода получен критерий пластичности и определяющие соотношения теории пластичности ортотропного материала с учетом констант кристаллической решетки и параметров преимущественной кристаллографической ориентации структуры для общего случая напряженного состояния, а также проведена их экспериментальная проверка.

Теоретические положения

Наиболее часто в обработке металлов давлением используется энергетическое условие пластичности Губера-Мизеса [22]. Согласно этой теории пластическая деформация начинается тогда, когда количество удельной потенциальной энергии формоизменения U_ϕ , накопленной деформированным элементом, достигает своего предельного значения U_ϕ^m :

$$F = U_\phi - U_\phi^m = 0. \quad (1)$$

Выразим потенциальную энергию изменения формы U_ϕ как разность полной потенциальной энергии деформации и энергии изменения объема:

$$U_\phi = \frac{1}{2} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} - \frac{1}{6} \sigma_{ii} \varepsilon_{jj}, \quad (2)$$

где σ_{ij} и ε_{ij} – тензоры напряжений и деформаций соответственно.

Тензор деформаций можно записать, используя обобщенный закон Гука:

$$\varepsilon_{ij} = S_{ijkl} \sigma_{kl}, \quad (3)$$

где S_{ijkl} – тензор модулей податливости относительно главных осей анизотропии (для листового материала ось 1 совпадает с направлением прокатки, ось 2 – поперечное направление и ось 3 – направление по толщине).

$$K_{ijkl} = \begin{bmatrix} \eta_{12} + \eta_{31} & -\eta_{12} & -\eta_{31} & 0 & 0 & 0 \\ -\eta_{12} & \eta_{12} + \eta_{23} & -\eta_{23} & 0 & 0 & 0 \\ -\eta_{31} & -\eta_{23} & \eta_{23} + \eta_{31} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4\left(\frac{5}{2} - \eta_{23}\right) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4\left(\frac{5}{2} - \eta_{31}\right) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4\left(\frac{5}{2} - \eta_{12}\right) \end{bmatrix}; \quad (7)$$

η_{ij} – обобщенные показатели анизотропии:

$$\eta_{ij} = 1 - \frac{15(A' - 1)}{3 + 2A'} \left(\Delta_i + \Delta_j - \Delta_k - \frac{1}{5} \right). \quad (8)$$

Выразим компоненты тензора S_{ijkl} через тензор модулей податливости S'_{pqrs} , отнесенный к кристаллографическим осям [001], [010] и [100] кристаллической решетки [23]:

$$\begin{aligned} S_{iiii} &= S'_{1111} - 4S'_{2323}(A' - 1)\Delta_i; \\ S_{ijij} &= S'_{1122} - 2S'_{2323}(A' - 1)(\Delta_k - \Delta_i - \Delta_j); \\ S_{ijij} &= S'_{2323} - 2S'_{2323}(A' - 1)(\Delta_k - \Delta_i - \Delta_j), \end{aligned} \quad (4)$$

где A' – параметр анизотропии кристаллической решетки:

$$A' = \frac{S'_{1111} - S'_{1122}}{2S'_{2323}}; \quad (5)$$

Δ_i – ориентационные факторы (параметры) текстуры, которые определяются при обработке обратных полюсных фигур, получаемых съемкой на дифрактометре [24].

Предполагая, что закон Гука справедлив вплоть до наступления предельного состояния пластичности, и подставляя (3)–(4) в выражение (2), получим потенциальную энергию формоизменения ортотропного материала в общем случае напряженного состояния:

$$U_\phi = \frac{S'_{2323}}{15} (3 + 2A') K_{ijkl} \sigma_{ij} \sigma_{kl}, \quad (6)$$

где K_{ijkl} – материальный тензор:

Из выражения (8) очевидно, что анизотропия материала обусловлена анизотропией кристаллической решетки A' (химическим составом) и кристаллографической текстурой Δ_i (режимами обработки). При этом в зависимости от параметра A' свойства материала отличаются от свойств изотропных тел даже при одинаковом характере текстуры. Для изотропной среды при $A'=1$ и/или $\Delta_i=1/5$ [26] обобщенные показатели анизотропии $\eta_{ij}=1$.

Для того чтобы все выражения теории были инвариантными, необходимо принять энергию формоизменения ортотропного тела равной соответствующей энергии изотропного материала:

$$U_{\phi}^{izo} = \frac{2}{15} S'_{2323} (3 + 2A') \sigma_i^2, \quad (9)$$

где σ_i – интенсивность напряжений.

Приравняв правые части выражений (6) и (9), определим величину интенсивности напряжений ортотропного материала через константы кристаллической решетки и параметры текстуры:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ \eta_{12} (\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + \eta_{23} (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + \eta_{31} (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + \right. \\ \left. + 4 \left[\left(\frac{5}{2} - \eta_{12} \right) \sigma_{12}^2 + \left(\frac{5}{2} - \eta_{23} \right) \sigma_{23}^2 + \left(\frac{5}{2} - \eta_{31} \right) \sigma_{31}^2 \right] \right\}^{1/2}. \quad (10)$$

При анализе процессов листовой штамповки можно принять, что кристаллографическая ориентация структуры не изменяется при деформировании, т.е. $\eta_{ij} = \text{const}$ [25]. Тогда, дифференцируя уравнение (10) согласно ассоциированному закону пластического течения [26], получим следующие уравнения связи деформаций и напряжений:

$$\begin{aligned} d\varepsilon_{11} &= \frac{1}{2} \frac{d\lambda}{\sigma_i} [\eta_{12} (\sigma_{11} - \sigma_{22}) - \eta_{31} (\sigma_{33} - \sigma_{11})]; \\ d\varepsilon_{22} &= \frac{1}{2} \frac{d\lambda}{\sigma_i} [\eta_{23} (\sigma_{22} - \sigma_{33}) - \eta_{12} (\sigma_{11} - \sigma_{22})]; \\ d\varepsilon_{33} &= \frac{1}{2} \frac{d\lambda}{\sigma_i} [\eta_{31} (\sigma_{33} - \sigma_{11}) - \eta_{23} (\sigma_{22} - \sigma_{33})]; \\ d\varepsilon_{12} &= 2 \frac{d\lambda}{\sigma_i} \left(\frac{5}{2} - \eta_{12} \right) \sigma_{12}; \quad d\varepsilon_{23} = 2 \frac{d\lambda}{\sigma_i} \left(\frac{5}{2} - \eta_{23} \right) \sigma_{23}; \\ d\varepsilon_{31} &= 2 \frac{d\lambda}{\sigma_i} \left(\frac{5}{2} - \eta_{31} \right) \sigma_{31}, \end{aligned} \quad (11)$$

где $d\lambda$ – неопределенный множитель Лагранжа.

Выражая напряжения из уравнений (11) и подставляя полученные зависимости в выражение для интенсивности напряжений (10), определим величину приращения интенсивности деформаций $d\varepsilon_i$:

$$\begin{aligned} d\varepsilon_i = d\lambda = \sqrt{2} \left\{ \left(\frac{1}{\eta_{12}} + \frac{1}{\eta_{23}} + \frac{1}{\eta_{31}} \right)^{-2} \left[\frac{1}{\eta_{12}} \left(\frac{d\varepsilon_{11}}{\eta_{31}} - \frac{d\varepsilon_{22}}{\eta_{23}} \right)^2 + \frac{1}{\eta_{23}} \left(\frac{d\varepsilon_{22}}{\eta_{12}} - \frac{d\varepsilon_{33}}{\eta_{31}} \right)^2 + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{1}{\eta_{31}} \left(\frac{d\varepsilon_{33}}{\eta_{23}} - \frac{d\varepsilon_{11}}{\eta_{12}} \right)^2 \right] + \frac{1}{4} \left[\frac{d\varepsilon_{12}^2}{\frac{5}{2} - \eta_{12}} + \frac{d\varepsilon_{23}^2}{\frac{5}{2} - \eta_{23}} + \frac{d\varepsilon_{31}^2}{\frac{5}{2} - \eta_{31}} \right] \right\}^{1/2}. \quad (12) \end{aligned}$$

Нетрудно показать, что для изотропной среды ($\eta_{ij}=1$) выражения (10), (11) и (12) принимают классический вид.

При простом нагружении, когда отношение компонент напряжений в процессе деформирования не изменяется, между приращениями деформаций наблюдается линейная зависимость. Тогда в формулах (13)–(15) приращения деформаций можно заменить конечными деформациями.

Экспериментальная проверка

Одним из проявлений анизотропии свойств материала является то, что кривые упрочнения, полученные при испытаниях на одноосное растяжение образцов, вырезанных под различными углами к направлению прокатки, неодинаковы. Воспользуемся данной особенностью для экспериментальной проверки разработанных соотношений теории пластичности анизотропных сред.

Введем интенсивности напряжений в направлении прокатки (НП) σ_{i1} , поперечном направлении (ПН) σ_{i2} и направлении нормали плоскости листа (НН) σ_{i3} , которые удовлетворяют следующим условиям при простом растяжении:

$$\begin{aligned}\sigma_{i1} &= \sigma_{11} \text{ при } \sigma_{22} = \sigma_{33} = \sigma_{12} = \sigma_{23} = \sigma_{31} = 0; \\ \sigma_{i2} &= \sigma_{22} \text{ при } \sigma_{11} = \sigma_{33} = \sigma_{12} = \sigma_{23} = \sigma_{31} = 0; \\ \sigma_{i3} &= \sigma_{33} \text{ при } \sigma_{11} = \sigma_{22} = \sigma_{12} = \sigma_{23} = \sigma_{31} = 0.\end{aligned}\quad (13)$$

Подставляя выражения (16) в условие (12), получим:

$$\begin{aligned}\sigma_i &= \frac{\sqrt{\eta_{12} + \eta_{31}}}{\sqrt{2}} \sigma_{i1} = \frac{\sqrt{\eta_{12} + \eta_{23}}}{\sqrt{2}} \sigma_{i2} = \\ &= \frac{\sqrt{\eta_{23} + \eta_{31}}}{\sqrt{2}} \sigma_{i3},\end{aligned}\quad (14)$$

аналогичные выражения можно получить и для интенсивности деформаций:

$$\begin{aligned}\varepsilon_i &= \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\eta_{12} + \eta_{31}}} \varepsilon_{i1} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\eta_{12} + \eta_{23}}} \varepsilon_{i2} = \\ &= \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\eta_{23} + \eta_{31}}} \varepsilon_{i3}.\end{aligned}\quad (15)$$

Как видно из полученных выражений (14)–(15), в отличие от изотропных сред интенсивности напряжений и деформаций анизотропного материала не совпадают с величинами напряжений и деформаций линейного растяжения и зависят от параметров кристаллической решетки и ориентационных факторов текстуры.

Таким образом, для подтверждения правильности соотношений (14)–(15), а значит и (10), (12), необходимо в условиях линейной схемы напряжений построить кривые упрочнения во взаимно перпендикулярных направлениях и проверить возможность перехода их друг в друга при учете обобщенных показателей анизотропии.

Испытания для построения кривых упрочнения проводились на плоских образцах толщиной 1,8 мм из алюминиевого сплава АМг5. Размеры образцов выбирались в соответствии с ГОСТ 11701-84. Образцы вырезались под углами 0 и 90° к направлению прокатки. На каждое направление испытывались по 3 образца, результаты испытаний усреднялись. Растяжение образцов производилось на универсальной испытательной машине Testometric FS150AX.

Ориентационные факторы текстуры ($\Delta_1=0,140$; $\Delta_2=0,165$; $\Delta_3=0,169$) листов из АМг5 определены на основании обратных полюсных фигур (рис. 1). Плоскость съемки полюсных фигур была параллельна плоскости листа. Текстура была исследована методом «на отражение» с использованием рентгеновского дифрактометра ДРОН-7 в CoK_α -излучении.

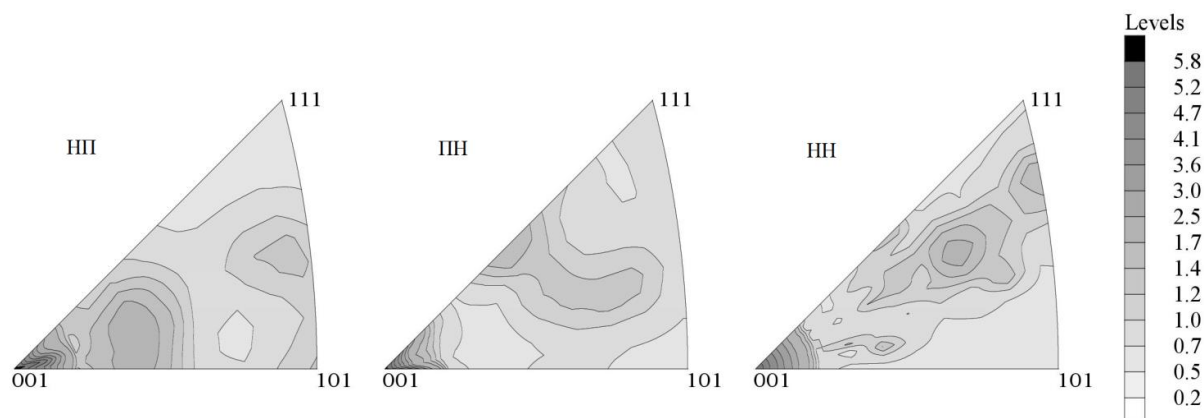


Рис. 1. Обратные полюсные фигуры сплава АМг5

Результаты испытаний на растяжение плоских образцов из сплава АМг5 приведены на рис. 2. По точкам экспериментальных кривых упрочнения продольных образцов определялись значения кривых упрочнения в поперечном направлении. Кривые упрочнения, построенные по результатам вычислений, представлены пунктирными линиями. Сопоставление расчетных зависимостей и результатов испытаний поперечных образцов показывает, что разница их незначительна и не превышает 2–3%.

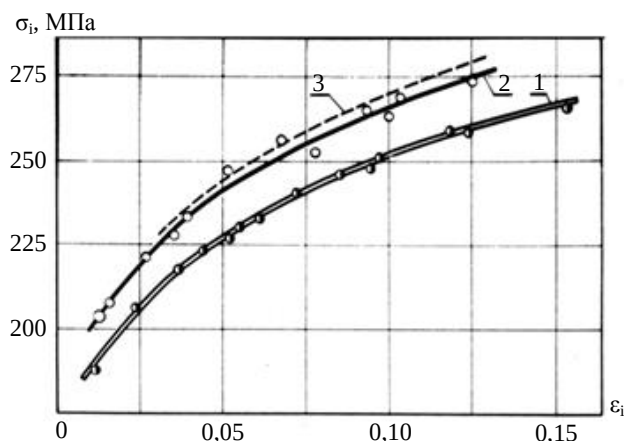


Рис. 2. Кривые упрочнения при одноосном растяжении продольных и поперечных образцов из сплава АМг5: 1 – продольные образцы; 2 – поперечные образцы (эксперимент); 3 – поперечные образцы (расчетные значения)

Заключение

В отличие от применяемых в технологических расчетах процессов пластического деформирования феноменологических критериев пластичности, не учитывающих параметров реального строения материалов, предложенный вариант теории пластичности позволяет: определять технологические характеристики процессов пластического формообразования с учетом констант кристаллической решетки и ориентационных факторов текстуры; проектировать кристаллографическую ориентацию структуры материалов в зависимости от требований процессов пластического формообразования или эксплуатации изделий. Правильность основных соотношений разработанного варианта теории пластичности анизотропных сред подтверждена экспериментально, при этом погрешность расчетов составляет не более 2–3%.

Также установлено, что для определения зависимостей между интенсивностью напряжений и деформаций в различных направлениях доста-

точно построить кривую упрочнения в одном из направлений и, зная ориентационные факторы текстуры и параметры кристаллической решетки, получить функциональные связи в других направлениях.

Список литературы

1. Truszkowski W. (2001), The Plastic Anisotropy in Single Crystals and Polycrystalline Metals, Springer, Netherlands.
2. Hutchinson W.B., Oscarsson A. and Karlsson A. (1989), "Control of microstructure and earing behaviour in aluminium alloy AA 3004 hot bands", Mater. Sci. Tech., 5, pp. 1118–1127.
3. Banabic D, Bunge H.J., Pohlandt K. and Tekkaya A.E. (2000), Formability Of Metallic Materials: Plastic Anisotropy, Formability Testing, Forming Limits, Springer, Berlin, Germany.
4. Engler O. and Hirsch J., (2002) "Texture control by thermo-mechanical processing of AA6xxx Al-Mg-Si sheet alloys for automotive applications - a review", Materials Science and Engineering A, 336, pp. 249–262.
5. Hirsch J., Al-Samman T. (2013) "Superior light metals by texture engineering: Optimized aluminum and magnesium alloys for automotive applications", Acta Materialia, 61, pp. 818–843.
6. Banabic D. (2010), Sheet Metal Forming Processes. Constitutive Modelling and Numerical Simulation, Springer, Berlin, Germany.
7. Mises R. 1928. Mechanik der plastischen Formänderung von Kristallen. ZAMM. 8, 161–185.
8. Hill R. 1948. A theory of the yield and plastic flow of anisotropic metals. Proc. Roy. Soc. London. Ser. A. 193, pp. 281–297.
9. Woodthorpe, J., Pearce, R. 1970. The anomalous Behavior of Aluminum Sheet under Balance Biaxial Tension. Int. J. Mech. Sci. 12, pp. 341–347.
10. Hill R. (1979), "Theoretical plasticity of textured aggregates", Math. Proc. Cambridge Philos. Soc., pp. 179–191.
11. Barlat F., Lian J. 1989. Plastic Behavior and Stretchability of Sheet Metals. Part 1: Yield Function for Orthotropic Sheets under Plane Stress Conditions. Int. J. Plasticity. 5, pp. 51–66.
12. Арышенский Ю.М., Калужский И.И., Уваров В.В. Некоторые вопросы теории пластичности ортотропных сред // Изв. вузов. Авиационная техника. 1969. №2. С. 15–18.
13. Арышенский Ю.М., Гречников Ф.В., Арышенский В.Ю. Определение требований к анизотропии листов в зависимости от вида их последующей штамповки // Кузнечно-штамповочное производство. 1990. №3. С. 16–19.
14. Barlat F., Lege D.J., Brem J.C. 1991. A six-component yield function for anisotropic materials. Int. J. Plasticity. 7, pp. 693–712.
15. Karafillis A.P., Boyce M.C. 1993. A general anisotropic yield criterion using bounds and a transformation weighting tensor. J. Mech. Phys. Solids. 41, pp. 1859–1886.
16. Barlat F., Brem J.C., Yoon J.W., Chung K., Dick R.E., Lege D.J., Pourboghrat F., Choi S.-H., Chu E. 2003. Plane stress yield function for aluminum alloy sheet. Part 1: Theory. Int. J. Plasticity. 19, pp. 1297–1319.
17. Barlat F., Aretz H., Yoon J.W., Karabrin M.E., Brem J.C. and Dick R.E. (2005), "Linear transformation based anisotropic yield functions", Int. J. Plasticity, 21, pp. 1009–1039.
18. Bron F., Besson J. 2003. A yield function for anisotropic materials. Application to aluminum alloys. Int. J. Plasticity. 20, pp. 937–963.
19. Cazacu O., Barlat F. 2001. Generalization of Drucker's yield criterion to orthotropy. Mathematics and Mechanics of Solids. 6, pp. 613–630.
20. Cazacu O., Barlat F. 2003. Application of representation theory to describe yielding of anisotropic aluminum alloys. Int. J. of Engng. Sci. 41, pp. 1367–1385.

21. Soare S. Banabic D. 2008. About mechanical data required to describe the anisotropy of thin sheets to correctly predict the earing of deep-drawn cups. *Int. J. Plasticity*. 4, pp. 34–37.
22. Hosford W.F. *Mechanical Behavior of Materials*. New-York, Cambridge University Press. 2005.
23. Адамеску Р.А., Гельд П.В., Митюшов Е.А. Анизотропия физических свойств металлов. М.: Металлургия, 1985. 136 с.
24. Гречников Ф.В. Деформирование анизотропных материалов. М.: Машиностроение, 1998. 446 с.
25. Hill R. *The Mathematical Theory of Plasticity*. New-York, Oxford University Press. 1950.
26. Арышенский Ю.М. Теория листовой штамповки анизотропных материалов. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1973. 112 с.

Материал поступил в редакцию 25.10.16

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-4-42-49

ANISOTROPIC MEDIUM YIELD FUNCTION ALLOWING FOR THE CRYSTALLOGRAPHIC STRUCTURE AND ITS EXPERIMENTAL VERIFICATION

Yaroslav A. Erisov – Ph.D. (Eng.), Associate Professor

Samara University, Samara, Russia. E-mail: yaroslav.erisov@mail.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9750-8211>

Fedor V. Grechnikov – D.Sc. (Eng.), Academician of RAS, First Deputy Chairman of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Head of Metal Forming Department

Samara University, Samara, Russia. E-mail: gretch@ssau.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3767-4004>

Sergei V. Surudin – Ph.D. (Eng.), Engineer at the Metal Forming Department

Samara University, Samara, Russia. E-mail: innosam63@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2479-2316>

Abstract

Problem Statement (Relevance): The current yield criteria enable to predict the behavior of anisotropic materials under plastic deformation conditions. However, they do not appear to allow for the physical basis of anisotropy, i.e. the crystalline structure of the material and the texture formed under severe plastic strain. Therefore, it would not be possible to solve the inverse problem using the above criteria. In other words, we cannot use the above criteria to determine what crystalline structure, which has to be obtained in semi-finished products, would be most adequate to the requirements of metal forming processes. **Objectives:** The objective is to derive a plasticity criterion and constitutive assumptions of the plasticity theory for orthotropic material allowing for the lattice constants and the parameters of the predominant crystallographic structure typical of the stress state. **Methods Applied:** The plasticity criterion was derived based on the specific distortion strain energy and using some tensor calculus and invariant theory elements. The constitutive assumptions of the anisotropic medium plasticity theory were proved to be correct through experiment. The experiment was based on the comparison between the hardening curve obtained as a result of the tensile testing of longitudinal and transverse samples and the calculated curve. **Originality:** Basic equations of the orthotropic medium plasticity theory were developed, which explicitly account for the crystallographic nature of anisotropy. **Findings:** It was established that in order to determine the relationships between stress and strain in different directions, one needs to build a hardening curve in just one direction. And then, based

on the texture orientation and the crystal lattice parameters, one can obtain the hardening curves for the other directions. In this case the calculation error does not appear to be more than 2-3%. **Practical Relevance:** The proposed variant of the plasticity theory allows to ensure improved processability and performance of the products by designing the texture components.

Keywords: Anisotropy, yield criterion, crystal lattice, texture, crystallographic orientation, hardening curve, tension test.

This research was conducted as part of Research Project No. 16-38-00495 with support from the Russian Foundation for Basic Research.

References

1. Truszkowski W. (2001), *The Plastic Anisotropy in Single Crystals and Polycrystalline Metals*, Springer, Netherlands.
2. Hutchinson W.B., Oscarsson A. and Karlsson A. (1989) Control of microstructure and earing behaviour in aluminium alloy AA 3004 hot bands, *Mater. Sci. Tech.*, 5, pp. 1118-1127.
3. Banabic D, Bunge H.J., Pohlandt K. and Tekkaya A.E. (2000), *Formability Of Metallic Materials: Plastic Anisotropy, Formability Testing, Forming Limits*, Springer, Berlin, Germany.
4. Engler O. and Hirsch J., (2002) Texture control by thermomechanical processing of AA6xxx Al-Mg-Si sheet alloys for automotive applications - a review, *Materials Science and Engineering A*, 336, pp. 249-262.
5. Hirsch J., Al-Samman T. (2013) Superior light metals by texture engineering: Optimized aluminum and magnesium alloys for automotive applications, *Acta Materialia*, 61, pp. 818–843.
6. Banabic D. (2010), *Sheet Metal Forming Processes. Constitutive Modelling and Numerical Simulation*, Springer, Berlin, Germany.
7. Mises R. 1928. *Mechanik der plastischen Formänderung von*

- Kristallen. ZAMM. 8, 161-185.
8. Hill R. 1948. A theory of the yield and plastic flow of anisotropic metals. Proc. Roy. Soc. London. Ser A. 193, pp. 281-297.
 9. Woodthorpe, J., Pearce, R. 1970. The anomalous Behavior of Aluminum Sheet under Balance Biaxial Tension. Int. J. Mech. Sci. 12, pp. 341-347.
 10. Hill R. (1979) Theoretical plasticity of textured aggregates, Math. Proc. Cambridge Philos. Soc., pp. 179-191.
 11. Barlat F., Lian J. 1989. Plastic Behavior and Stretchability of Sheet Metals. Part 1: Yield Function for Orthotropic Sheets under Plane Stress Conditions. Int. J. Plasticity. 5, pp. 51-66.
 12. Aryshenskii Yu.M., Kaluzhskii I.I. and Uvarov V.V. Some issues of the orthotropic medium plasticity theory. *Izvestiya vuzov. Aviatsonnaya Tekhnika* [Proceedings of Russian universities: Aviation Engineering], 1969, no. 2, pp. 15-18. (In Russ.)
 13. Aryshenskii Yu.M., Grechnikov F.V. and Aryshenskii V.Yu. Identifying sheet anisotropy requirements depending on further forming. *Kuznechno-shtampovoe roizvodstvo* [Die forging], 1990, no. 3, pp. 16-19. (In Russ.)
 14. Barlat F., Lege D.J., Brem J.C. 1991. A six-component yield function for anisotropic materials. Int. J. Plasticity. 7, pp. 693-712.
 15. Karafillis A.P., Boyce M.C. 1993. A general anisotropic yield criterion using bounds and a transformation weighting tensor. J. Mech. Phys. Solids. 41, pp. 1859-1886.
 16. Barlat F., Brem J.C., Yoon J.W., Chung K., Dick R.E., Lege D.J., Pourboghrat F., Choi S.-H., Chu E. 2003. Plane stress yield function for aluminum alloy sheet. Part 1: Theory. Int. J. Plasticity. 19, pp. 1297-1319.
 17. Barlat F., Aretz H., Yoon J.W., Karabrin M.E., Brem J.C. and Dick R.E. (2005), "Linear transformation based anisotropic yield functions", Int. J. Plasticity, 21, pp. 1009-1039.
 18. Bron F., Besson J. 2003. A yield function for anisotropic materials. Application to aluminum alloys. Int. J. Plasticity. 20, pp. 937-963.
 19. Cazacu O., Barlat F. 2001. Generalization of Drucker's yield criterion to orthotropy. Mathematics and Mechanics of Solids. 6, pp. 613-630.
 20. Cazacu O., Barlat F. 2003. Application of representation theory to describe yielding of anisotropic aluminum alloys. Int. J. of Engng. Sci. 41, pp. 1367-1385.
 21. Soare S. Banabic D. 2008. About mechanical data required to describe the anisotropy of thin sheets to correctly predict the earing of deep-drawn cups. Int. J. Plasticity. 4, pp. 34-37.
 22. Hosford W.F. Mechanical Behavior of Materials. New-York, Cambridge University Press. 2005.
 23. Adamesku R.A., Geld P.V., Mityushov E.A. The anisotropy of the physical properties of metals. Moscow: Metallurgiya, 1985, 136 p. (In Russ.)
 24. Grechnikov F.V. Deformation of anisotropic materials. M.: Mashinostroenie, 1998, 446 p. (In Russ.)
 25. Hill R. The Mathematical Theory of Plasticity. New-York, Oxford University Press. 1950.
 26. Aryshenskii Yu.M. The theory of anisotropic sheet metal stamping. Publishing House of Saratov University, 1973, 112 p. (In Russ.)

Received 25/10/16

Ерисов Я.А., Гречников Ф.В., Сурудин С.В. Критерий пластичности анизотропной среды с учетом кристаллографии структуры и его экспериментальная проверка // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т.14. №4. С. 42–49. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-4-42-49

Erisov Ya.A., Grechnikov F.V., Surudin S.V. Anisotropic medium yield function allowing for the crystallographic structure and its experimental verification. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 4, pp. 42–49. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-4-42-49

РЕЦИКЛИНГ КУСОЧНЫХ ОТХОДОВ МЕДНОЙ ПРОВОЛОКИ В ИСХОДНУЮ ДЛИННОМЕРНУЮ ПРОДУКЦИЮ МЕТОДАМИ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ

Загиров Н.Н.¹, Логинов Ю.Н.², Иванов Е.В.¹

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

² Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

Аннотация

Постановка задачи (актуальность работы): в статье рассмотрены технологические особенности изготовления длинномерных прутков и проволоки из кусковых фракций меди на основе применения методов термомеханической обработки некомпактных материалов. Использование предлагаемой схемы позволит повысить выход годного при переработке данного вида отходов за счет исключения угара металла, свойственного плавильному переделу. **Цель работы:** практическое опробование энерго- и ресурсосберегающего способа переработки кусочных отходов медной проволоки в полуфабрикаты и изделия с заданным уровнем механических характеристик. **Используемые методы:** основу предлагаемой схемы составляли выполняемые при определенных условиях такие технологические операции, как горячее брикетирование, горячая экструзия, холодное волочение и отжиг. Для оценки прочностных и пластических свойств получаемой прутково-проволочной продукции применяли стандартные испытания на растяжение. **Новизна:** к элементам новизны относится реализация нестандартного подхода к переработке сортных металлических отходов, основанного на использовании приемов, широко распространенных в порошковых и гранульных технологиях, но малоприменяемых при рециклинге вторичного сырья. **Результат:** показана принципиальная возможность получения длинномерной медной проволоки из представляющих отходы производства отдельных кусочных фрагментов, используя только методы термомеханической обработки. На всех стадиях ее изготовления поведение материала носит характер, во многом схожий с поведением соответствующих полуфабрикатов из компактной меди. Установлено, что, комбинируя величиной суммарного относительного обжатия при волочении и местом расположения в маршруте волочения промежуточного рекристаллизационного отжига, можно варьировать уровнем и соотношением достигаемых у получаемой проволоки прочностных и пластических характеристик. **Практическая значимость:** приобретенный опыт и результаты проведенных исследований могут служить потенциальной основой для распространения и проектирования подобного рода технологий переработки металлических мелкогабаритных отходов применительно к другим их видам, в том числе и для ряда других цветных металлов и сплавов.

Ключевые слова: медь, проволочные отходы производства, брикетирование, экструзия, волочение, отжиг, механические свойства, структура.

Введение

Среди многих задач, которые приходится решать производителям и потребителям различного рода металлопродукции, немало связано с поисками путей эффективного использования образующихся в том или ином виде отходов. Несоблюдение ряда установленных принципов при подготовке отходов к переработке по традиционной схеме через их переплав означает нарушение требований к химическому составу, который имеет первостепенное значение при выплавке металла или сплава определенной марки.

Некоторые особенности сопровождают возникновение отходов в области обработки меди. В отличие от сплавов меди (бронз, латуней) сама медь выступает в роли материала не конструкционного, а функционального назначения. Обработка материалов конструкционного назначения

приводит к получению деталей и узлов и часто выполняется методами обработки резанием с появлением отходов в виде стружки. Медь отличается от других материалов высокой электро- и теплопроводностью. В результате большая часть изделий из меди выпускается в виде проводников тока и труб различного диаметра.

Известно, что в структуре себестоимости готовой продукции во многих случаях около 50% занимает стоимость исходного сырья. Поэтому поиск наиболее рациональных путей использования для изготовления конкретных изделий соответствующих отходов производства будет способствовать снижению общего расхода металла на единицу готовой продукции.

Ряд исследователей занимались проблемой утилизации стружковых отходов, в том числе применительно к алюминиевым сплавам [1–3], сплавам магния [4], меди [5] и титана [6].

При рассмотрении вопросов, касающихся переработки сыпучих сортных металлических отходов, минуя плавильный передел [7], важное значение имеет предполагаемая область применения получаемых таким образом металлоизделий. Одним из вариантов, который представляется наиболее логичным, является изготовление из имеющихся в наличии отходов непосредственно той продукции, которая и послужила основой для их образования. В первую очередь это касается, на наш взгляд, обрывков и кусочных фрагментов отходов холодно-тянутой проволоки.

Источники возникновения отходов в этой области следующие:

1. Непосредственно в производстве длинномерных изделий методом волочения возникает передняя обрезь из-за необходимости утонения переднего конца для заправки в волоку.

2. На волочильных станах, реализующих процесс непрерывного волочения, применяется сварка заготовок встык, для чего торцы соседних заготовок подвергают обрезке с возникновением отходов.

3. При сварке заготовок образуется грат, который должен быть удален, представляющий собой самостоятельный вид отходов производства [8].

4. Волочильный передел так или иначе сопровождается обрывностью [9], с большим количеством причин ее происхождения, при перезаправке станов возникают дополнительные отходы в виде немерных отрезков проволоки.

5. В технологии производства электрических машин и трансформаторов поставка проводника тока осуществляется с избытком по длине, после намотки статора, ротора или сердечника этот избыток остается в виде немерного отрезка проволоки, представляющего в таком состоянии отходы производства.

Этот перечень показывает, что источники появления отходов являются не случайными, а постоянными факторами реального производства.

Материалы и методы исследования

В работе в качестве исходного материала для получения изделий были выбраны сортные отходы в виде проволочной обрезки из меди марки М1, общий вид которых показан на **рис. 1, а**.

Задача стояла получить из указанных отходов проволоку определенного диаметра с заданным уровнем механических характеристик, используя только приемы порошковой металлургии, обработки давлением и термообработки.

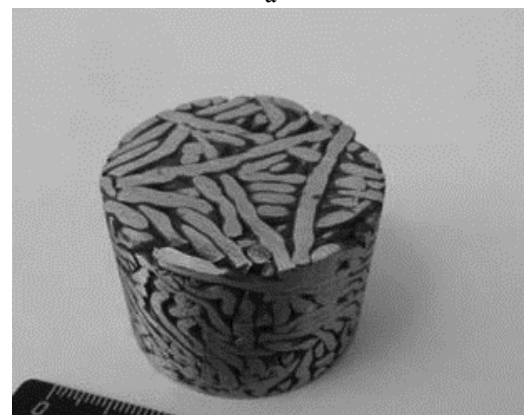
Замер диаметра и определение методом растяжения механических свойств исходных кусочных фрагментов проволоки позволили

уточнить основные характеристики получаемой из отходов проволочной продукции, на которые необходимо было ориентироваться при проведении исследований:

- диаметр $d=2,2$ мм;
- временное сопротивление разрыву $\sigma_B=270\pm 5$ МПа;
- относительное сужение $\Psi=50\pm 5\%$.



а



б



в

Рис. 1. Общий вид исходных отходов (а), прессовки после горячего брикетирования (б) и прутка после горячей экструзии (в)

Указанные показатели соответствуют по ГОСТ 1535-2006 свойствам медной проволоки в

полутвердом состоянии [10].

Разработанная общая технологически схема изготовления длинномерной проволоки предполагала выполнение следующих основных операций:

1. Подготовка исходных компонентов к компактированию, подразумевающая, в силу специфики их происхождения, лишь незначительную очистку от посторонних включений и промывку в содовом растворе для удаления следов смазки.

2. Горячее брикетирование в жесткой пресс-форме при температуре порядка $\theta_{бр}=450\text{--}500^\circ\text{C}$, давлении брикетирования $p=200$ МПа и времени выдержки при этом давлении в течение $\tau=5$ мин.

Температура нагрева была выбрана из условия, что она должна быть выше температуры рекристаллизации меди и ниже температуры начала ее интенсивного окисления. Диаметр рабочего канала пресс-формы составлял 42 мм. Масса засыпаемых в пресс-форму отходов принималась равной 350 г. Давление брикетирования назначалось, исходя из условия превышения его величины предела текучести материала при заданной температуре обработки. В результате были получены прессовки с соотношением высоты к диаметру, равным порядка 0,75. Интегральная плотность прессовки составляла $8,3 \text{ г/см}^3$, что соответствовало относительной плотности около 93%. Вид прессовки после осуществления горячего брикетирования приведен на **рис. 1, б**.

3. Нагрев прессовки до температуры 900°C в стоящей рядом с вертикальным прессом усилием 1 МН печи, подача нагретой заготовки к прессу и горячая экструзия через коническую матрицу прямым методом.

Принятая температура нагрева прессовок перед экструзией соответствовала «верхним» границам температурного интервала горячей обработки меди [11]. Это связано с тем, что при перемещении прессовки от печи к нагретой до температуры около 450°C инструментальной оснастки неизбежно некоторое ее охлаждение, однако нельзя допустить снижения температуры больше чем на $200\text{--}300^\circ\text{C}$. Коэффициент вытяжки при получении прутка $\varnothing 6$ мм, внешний вид которого показан на **рис. 1, в**, составлял 56.

Однократное холодное волочение на цепном волочильном стане усилием 50 кН, осуществляемое по маршруту: $6,0 \rightarrow 5,0 \rightarrow 4,0 \rightarrow 3,5 \rightarrow 3,0 \rightarrow 2,6 \rightarrow 2,2$ мм. При его составлении учитывалась возможность проведения после одного из этапов обработки давлением операции «отжиг» при температуре 500°C и времени выдержки 60 мин.

Результаты исследования и их обсуждение

Поскольку в работе речь идет о получении проволоки фиксированных размеров с заданными механическими свойствами, то, как известно [12], требуемые показатели в этом случае достигаются комбинированием на завершающем этапе обработки промежуточного отжига и следующего за ним волочения с определенной величиной суммарного относительного обжатия. Так как графическое представление кривой упрочнения при холодной обработке рассматриваемой категории прутково-проволочного материала на медной основе в литературе отсутствует, решено было на первом этапе протянуть полученный горячепрессованный прут $\varnothing 6$ мм до конечного размера без промежуточного отжига. При этом на нескольких промежуточных диаметрах производился отбор фрагментов проволоки, по результатам испытаний на растяжение которых осуществлялось построение соответствующей кривой упрочнения с одновременным установлением зависимости показателя пластичности (относительного сужения ψ) от величины суммарного относительного обжатия ε . Указанные зависимости в виде совокупности экспериментальных точек отображены на **рис. 2**, причем изменение прочностных характеристик (**рис. 2, а**), имеющее в целом общепринятый для холодной обработки вид, может быть аппроксимировано уравнением

$$\sigma_B = 228 + 3,81\varepsilon - 0,019\varepsilon^2.$$

В результате на $\varnothing 2,2$ мм ($\varepsilon=87\%$) прочность проволоки достигает значений $\sigma_B=415\pm 5$ МПа.

Зависимость же, отражающая изменение пластических свойств (**рис. 2, б**), имеет достаточно специфический вид, обусловленный особенностями уплотнения и деформирования используемого для изготовления проволоки исходного сырья. Результаты проведенных испытаний показывают, что с повышением ε относительное сужение сначала растет, достигая максимальных значений при $\varepsilon=40\text{--}50\%$, а затем снижается, составляя на $\varnothing 2,2$ мм величину $\psi=10\pm 2\%$. По-видимому, это можно объяснить тем, что и в ходе экструзии, и на начальных переходах волочения развиваемые деформации еще не достигают того уровня, чтобы обеспечить качественное соединение отдельных проволочных кусочков между собой. При повышении степени деформации площадь контактного соприкосновения стремится к своему максимуму, в результате чего изменение пластичности материала проволоки начинает носить предсказуемый убывающий характер, свойственный поведению беспористых материалов при холодной обработке.

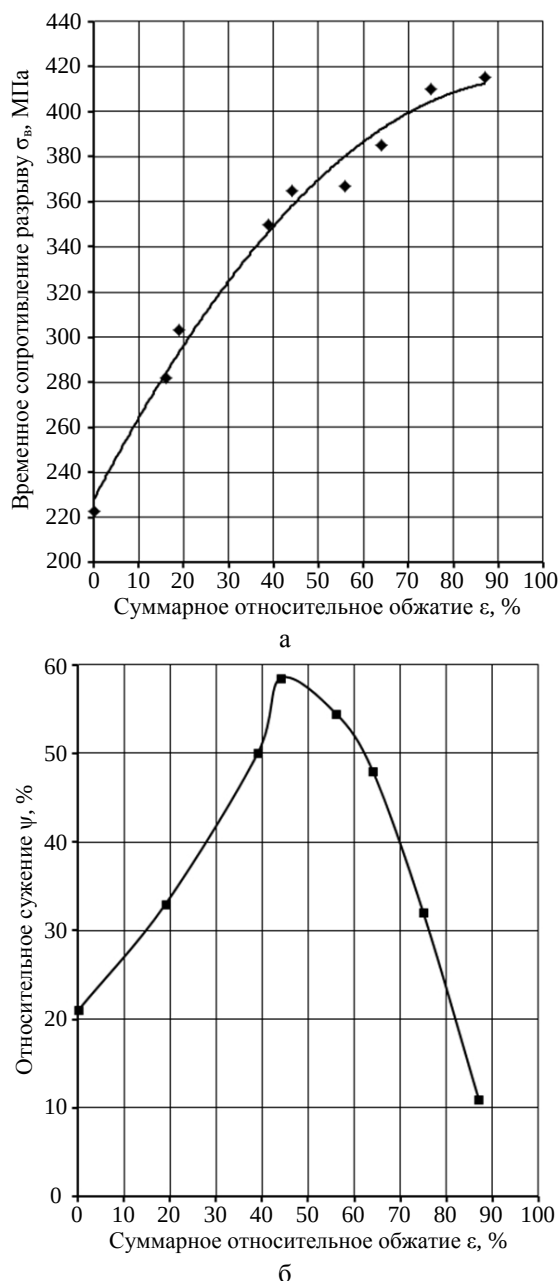


Рис. 2. Механические характеристики прутков и проволоки из медных кусочных проволочных отходов после горячей экструзии ($\epsilon=0$) и холодного волочения с разной величиной суммарного относительного обжатия

Проведенный на конечном $\varnothing 2,2$ мм отжиг по упомянутому выше режиму ($\theta_{\text{отж}}=500^\circ\text{C}$, $\tau_{\text{отж}}=1$ ч) вызывает снижение прочностных характеристик проволоки до отметки $\sigma_B=220\pm 5$ МПа с одновременным повышением пластичности до значений $\psi=20\pm 5\%$. Таким образом, для того чтобы обеспечить выполнение требований по заданным показателям прочности получаемой проволоки, промежуточный отжиг необходимо производить чуть раньше на $\varnothing 2,3\text{--}2,4$ мм. Это делается с той целью, что-

бы на заключительном отрезке можно было осуществить деформацию со строго рассчитанной величиной относительного обжатия $\epsilon=10\%$. При этом достичь параллельно требуемых по условиям задачи показателей пластичности в любом случае не удастся из-за специфики поведения материала, из которого проволока была изготовлена.

В ходе выполнения специально спланированных экспериментов были подтверждены приведенные выше рассуждения, которые были дополнены данными об уровне значений механических характеристик проволоки $\varnothing 2,2$ мм, получаемой волочением с промежуточным отжигом, проводимом в других местах по ходу реализации указанного выше маршрута волочения.

Решено было осуществить отжиг проволоки на диаметрах 5,0; 4,0 и 3,0 мм, в результате чего при волочении до конечного диаметра 2,2 мм суммарное относительное обжатие составило соответственно 81; 70 и 46 %.

На рис. 3 отражено изменение свойств проволоки $\varnothing 2,2$ мм после проведения промежуточного отжига на разных диаметрах и последующего волочения до конечного размера с определенной величиной суммарного относительного обжатия ϵ .

Как и следовало ожидать, чем больше величина ϵ , тем выше значение прочностных свойств полученной проволоки, причем рост σ_B подчиняется степенной зависимости, описываемой уравнением

$$\sigma_B = 223 + 14,22\epsilon^{0,561}.$$

Характер изменения пластических характеристик опять же будет несколько отличаться от традиционного за счет наличия максимума достигаемых значений ψ холоднотянутой проволоки, полученной с величиной суммарного относительного обжатия после отжига на уровне 60–70%.

Одновременно с выполнением механических испытаний полученной проволоки с использованием микроскопа AXIO OBSERVER.D1m были проведены исследования ее структуры в продольном и поперечном направлениях (рис. 4). В качестве сравниваемых объектов были выбраны: фрагмент исходных кусочных проволочных отходов (характерная структура приведена на рис. 4, а); проволока $\varnothing 2,2$ мм, изготовленная из горячепрессованного прутка без проведения промежуточного отжига (рис. 4, б); проволока того же диаметра, изготовленная с промежуточным отжигом на $\varnothing 4$ мм (рис. 4, в). Из сопоставления структур следует, что полученная из отходов проволока не совсем отвечает требованиям по сплошности. Причем в большей мере это касается периферийных участков проволоки, где в первую очередь и начинают появляться разрывы.

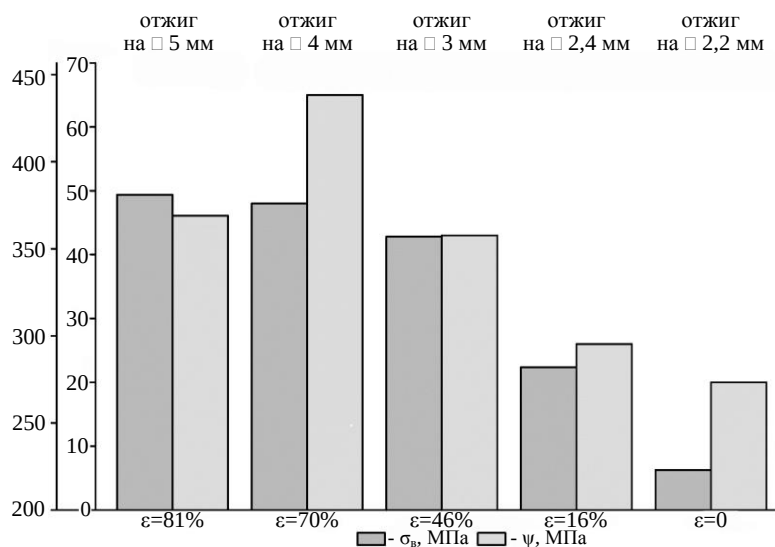


Рис. 3. Свойства проволоки $\varnothing 2,2$ мм после проведения промежуточного отжига ($\theta_{\text{отж}}=500^{\circ}\text{C}$, $\tau_{\text{отж}}=1$ ч) на разных диаметрах и последующего волочения до конечного размера с определенной величиной суммарного относительного обжатия

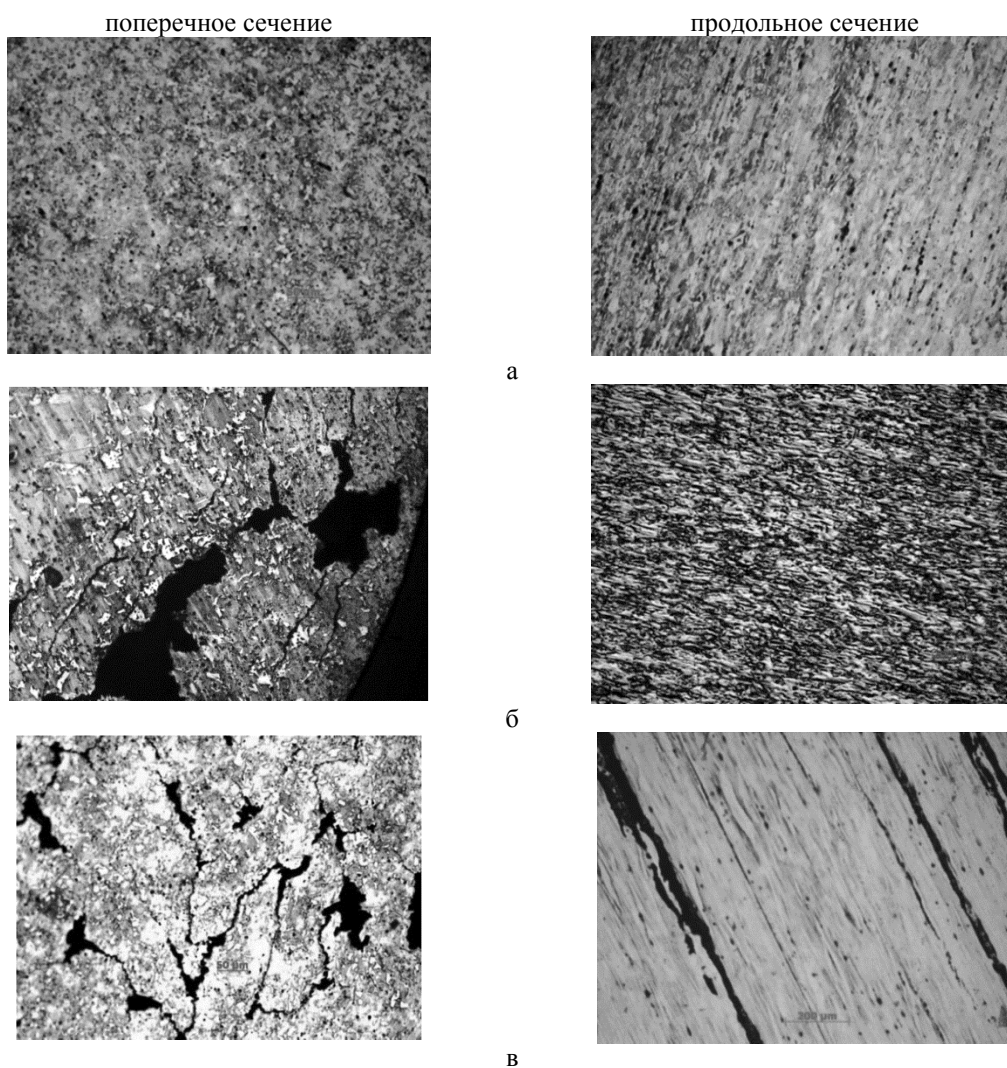


Рис. 4. Характерная микроструктура ($\times 200$) исходных кусочных проволоочных фрагментов (а) и проволоки $\varnothing 2,2$ мм, полученной из них без проведения промежуточного отжига (б) и с отжигом на $\varnothing 4$ мм (в)

Кроме того, при волочении сплошность может нарушаться в результате создания сложной схемы напряженного состояния с преобладанием растягивающих напряжений в местах присутствия дефектов типа частиц оксидов, что показано в работах [13–15].

Заключение

Обобщая все вышеизложенное, можно сделать следующие выводы. Принципиально получить длинномерную медную проволоку из ее отдельных кусочных фрагментов, представляющих собой отходы производства, используя только методы обработки давлением, особых сложностей не представляет. На всех стадиях ее изготовления, включающих этапы горячего брикетирования (прессования), горячей экструзии, холодного волочения и промежуточной термообработки, поведение материала носит предсказуемый характер, во многом схожий с поведением соответствующих полуфабрикатов из компактной меди. Комбинируя величиной суммарного относительного обжатия при волочении и местом проведения промежуточного рекристаллизационного отжига, можно варьировать уровнем достигаемых у получаемой проволоки прочностных характеристик. Приобретаемые при этом пластические свойства, обусловленные спецификой сформированной структуры проволоки, характеризующейся наличием дефектов сплошности, будут значительно ниже по сравнению с проволокой, изготовленной из компактной меди.

Список литературы

1. Ab Rahim S.N., Lajis M.A., Ariffin S. A review on recycling aluminum chips by hot extrusion process. *Procedia CIRP*. 2015. V. 26. P. 761–766.
2. Ryoichi Chiba, Morihiro Yoshimura. Solid-state recycling of aluminium alloy swarf into c-channel by hot extrusion. *Journal of Manufacturing Processes*. 2015. V. 17. P. 1–8.
3. Haase Matthias, Tekkaya A. Erman. Recycling of aluminum chips by hot extrusion with subsequent cold extrusion. *Procedia Engineering*. 2014. V. 81. P. 652–657.
4. Anilchandra A.R., Surappa M.K. Microstructure and tensile properties of consolidated magnesium chips. *Materials Science and Engineering: A*. 2003. V. 560. P. 759–766.
5. Uwe Hofmann, Essam El-Magd. Behaviour of Cu-Zn alloys in high speed shear tests and in chip formation processes. *Materials Science and Engineering A*. V. 2005. V. 395. P. 129–140.
6. Малиновская И.Д., Демин А.Б. Исследование технологического процесса утилизации титановых отходов компактированием. *Современные ресурсосберегающие технологии получения и обработки материалов в машиностроении*. Киев, 1991. С.12–14.
7. Загиров Н.Н., Логинов Ю.Н. Технологические основы получения материалов и изделий из сыпучих стружковых отходов меди и ее сплавов методами обработки давлением: монография. Красноярск: Сиб. фед. ун-т, 2015. 171 с.
8. Loginov Y.N., Illarionov A.G., Klyueva S.Y., Ivanova M.A. Deformations and structure of metal during cold butt-seam welding of copper blanks. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2012. V. 53. Iss. 1. P. 45–53.
9. Логинов Ю.Н., Осминин А.С., Копылова Т.П. Исследование изменения относительного сужения кислородсодержащей медной проволоки по маршруту волочения // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2012. № 5. С. 29–32.
10. Медные сплавы. Марки, свойства, применение: справочник / Райков Ю. Н., Ашихмин Г. В., Полухин В. П., Гуляев А. С. М.: ОАО «Институт «Цветметобработка», 2011. 456 с.
11. Шевакин Ю. Ф., Грабарник Л. М., Нагайцев А. А. Прессование тяжелых цветных металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1987. 246 с.
12. Брабец В. И. Проволока из тяжелых цветных металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1984. 296 с.
13. Hoon Cho, Hyung-Ho Jo, Sang-Gon Lee, Byung-Min Kim, Young-Jig Kim Effect of reduction ratio, inclusion size and distance between inclusions on wire breaks in Cu fine wire-drawing. *Journal of Materials Processing Technology*. 2002. V. 130–131. P. 416–420.
14. Loginov Y.N., Demakov S.L., Illarionov A.G., Ivanova M.A. Interaction of a copper oxide particle with copper in drawing. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2012. V. 11. P. 947–953.
15. Garcia V.G., Cabrera J.M., Prado J.M. Role of Cu₂O during hot compression of 99.9% pure copper. *Materials Science and Engineering A*. 2008. V. 488. P. 92–101.

Материал поступил в редакцию 05.02.16.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-4-50-56

RECYCLING OF COPPER WIRE SCRAP INTO INITIAL LONG PRODUCTS BY METAL FORMING

Nikolay N. Zagirov – Ph.D. (Eng.), Associate Professor
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: kafomd_1@mail.ru

Yury N. Loginov – D.Sc. (Eng.), Professor
Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia. E-mail: unl@mtf.ustu.ru

Evgeny V. Ivanov – Assistant Professor
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: kafomd_1@mail.ru

Abstract

Problem Statement (Relevance): This article describes a technology of making long rods and wire from lump copper by hot deformation of sparse materials. The proposed method may help increase the yield as it eliminates the waste of metal which is a typical feature of the melting operation. **Objectives:** The objective is to test the energy- and resource-saving method of processing waste copper wire to produce semi-finished and finished products with given mechanical characteristics. **Methods Applied:** The proposed method is based on such processes as hot briquetting, hot extrusion, cold drawing and annealing, which take place under specified conditions. A conventional tensile test procedure was used to analyse the strength and ductility of copper rods and wire. **Originality:** This article offers an original approach to waste steel product processing based on the methods that are extensively used in powder and granular technologies, but that are not popular in secondary raw materials recycling industry. **Findings:** The authors demonstrated the possibility of producing long copper wire from waste fragments exclusively by hot deformation. The behavior of the material at all the stages is similar to that of semi-finished products made from compact copper. It was found that it was possible to vary the degree and the combination of strength and ductility in the resultant wire by changing the total reduction during drawing and the place of recrystallization annealing in the drawing sequence. **Practical Relevance:** This experience and the results of the research may be a potential basis for popularizing and designing similar metal processing technologies which can also be applicable to non-ferrous metals and alloys.

Keywords: Copper, wire waste materials, briquetting, extrusion, drawing, annealing, mechanical properties, structure.

References

1. Ab Rahim S.N., Lajis M.A., Ariffin S. A review on recycling aluminum chips by hot extrusion process. *Procedia CIRP*. 2015, vol. 26, pp. 761–766.
2. Ryoichi Chiba, Morihiro Yoshimura. Solid-state recycling of aluminium alloy swarf into c-channel by hot extrusion. *Journal of Manufacturing Processes*. 2015, vol. 17, pp. 1–8.
3. Haase Matthias, Tekkaya A. Erman. Recycling of aluminum chips by hot extrusion with subsequent cold extrusion. *Procedia Engineering*. 2014, vol. 81, pp. 652–657.
4. Anilchandra A.R., Surappa M.K. Microstructure and tensile properties of consolidated magnesium chips. *Materials Science and Engineering: A*. 2003, vol. 560, pp. 759–766.
5. Uwe Hofmann, Essam El-Magd. Behaviour of Cu-Zn alloys in high speed shear tests and in chip formation processes. *Materials Science and Engineering A.V.* 2005, vol. 395, pp. 129–140.
6. Malinovskaya I.D., Demin A.B. The study of the titanium waste recycling by compaction. *Modern resource saving technologies of material working in mechanical engineering*. Kiev, 1991, pp. 12–14.
7. Zagirov N.N., Loginov Yu.N. The basic technology of producing materials and products from bulk copper chips and copper alloys by metal forming: monograph. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2015, 171 p. (In Russ.)
8. Loginov Y.N., Illarionov A.G., Klyueva S.Y., Ivanova M.A. Deformations and structure of metal during cold butt-seam welding of copper blanks. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2012, vol. 53, iss. 1, pp. 45–53.
9. Loginov Yu.N., Osminin A.S., Kopylova T.P. The study of changing reduction of oxygen copper wire in the process of drawing. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii* [Blank production in machine building industry], 2012, no. 5, pp. 29–32.
10. Raikov Yu.N., Ashikhmin G.V., Polukhin V.P., Gulyaev A.S. *Mednye splavy. Marki, svoystva, primeneniye: spravochnik* [Copper alloys. Brands, properties, application: handbook] Moscow: The Tsvetmetobrabotka Institute, 2011. 456 p. (In Russ.)
11. Shevakin Yu.F., Grabarnik L.M., Nagaitsev A.A. *Pressovanie tyazhelykh tsvetnykh metallov i splavov* [Extrusion of heavy non-ferrous metals and alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1987. 246 p. (In Russ.)
12. Brabets V.I. *Provoloka iz tyazhelykh tsvetnykh metallov i splavov* [Wire made of heavy non-ferrous metals and alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1984. 296 p.
13. Hoon Cho, Hyung-Ho Jo, Sang-Gon Lee, Byung-Min Kim, Young-Jig Kim Effect of reduction ratio, inclusion size and distance between inclusions on wire breaks in Cu fine wire drawing. *Journal of Materials Processing Technology*. 2002, vol. 130–131, pp. 416–420.
14. Loginov Y.N., Demakov S.L., Illarionov A.G., Ivanova M.A. Interaction of a copper oxide particle with copper in drawing. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2012, vol. 11, pp. 947–953.
15. Garcia V.G., Cabrera J.M., Prado J.M. Role of Cu₂O during hot compression of 99.9% pure copper. *Materials Science and Engineering A*. 2008, vol. 488, pp. 92–101.

Received 05/02/16

Загиров Н.Н., Логинов Ю.Н., Иванов Е.В. Рециклинг кусочных отходов медной проволоки в исходную длинномерную продукцию методами обработки давлением // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т.14. №4. С. 50–56. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-4-50-56

Zagirov N.N., Loginov Yu.N., Ivanov E.V. Recycling of copper wire scrap into initial long products by metal forming. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 4, pp. 50–56. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-4-50-56

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ТРЕНИЯ НА ЭНЕРГОСИЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА НАРУЖНОЙ ВЫСАДКИ КОНЦОВ ТРУБ

Некрасов И.И., Карамышев А.П., Паршин В.С., Федулов А.А., Дронов А.И., Хорев В.А.

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

Аннотация

Постановка задачи: процесс наружной высадки концов труб используется при получении утолщенного конца насосно-компрессорной трубы. Для получения достоверных данных о технологических параметрах процесса высадки осуществлялось моделирование последовательных технологических операций данного процесса на примере высадки концов труб на прессе SMS Meer, установленного в ОАО «ПНТЗ», с использованием программного комплекса конечно-элементного моделирования. Рассматривались трубы трех типоразмеров, представляющих интерес для существующего производства. **Используемые методы:** построены трехмерные объекты, воспроизводящие заготовку, высадочный пуансон и составную матрицу. Производилось назначение свойств данных объектов. Задавались условия трения, движение и закрепление объектов в пространстве. Варьировались условия трения между высадочным инструментом и заготовкой. **Результаты:** путем расчета по предлагаемой модели получены зависимости усилия высадки от времени при различных значениях показателя трения по Э. Зибелю. Проведенные экспериментальные исследования позволяют говорить об адекватности созданной математической модели реальному процессу высадки. **Практическая значимость:** значения величин, полученные путем моделирования, могут быть использованы при создании технологии, оборудования и инструмента для наружной высадки концов труб.

Ключевые слова: наружная высадка, насосно-компрессорные трубы, математическая модель, усилие высадки, показатель трения.

Введение

Как известно, условия трения на границе инструмента с металлом при обработке металлов давлением в значительной мере определяют стойкость инструмента, формоизменение металла, а также энергосиловые параметры процесса [1–5]. Таким образом, исследование условий трения в процессах ОМД позволяет наиболее эффективно выстроить технологию обработки металла, вести конструирование оборудования и инструмента для конкретного производства [6–7].

Процесс наружной высадки концов труб является одним из тех, где работа, затрачиваемая на преодоление сил трения, составляет значительную часть энергетических затрат, связанных с осуществлением деформации металла. Наружная высадка концов труб осуществляется на сегодня в основном с применением высадочных прессов и подразумевает наличие составной матрицы и пуансона, образующих рабочее пространство инструмента. Заготовка подвергается

нагреву до температуры деформации и устанавливается на ось прессования. Путем перемещения пуансона происходит образование утолщенного конца трубы в соответствии с рис. 1.

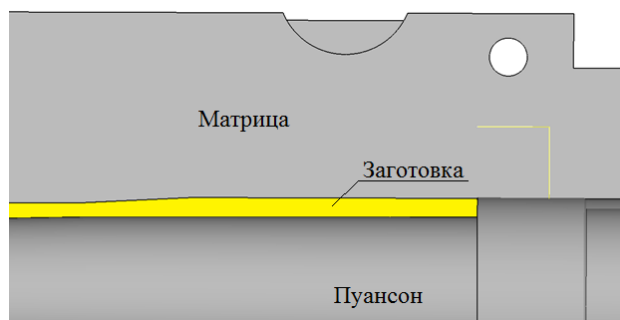


Рис. 1. Схема процесса наружной высадки концов труб

Развитие технологии горячей прокатки и наружной высадки концов труб в условиях ОАО «Первоуральский новотрубный завод» позволило вести работы по освоению труб НКТ из коррозионностойких марок сталей 18ХМФБ, 18ХЗМФБ, 15Х5МФБ на прессе фирмы SMSMeer ОАО «ПНТЗ» [8].

Моделирование процесса наружной высадки концов насосно-компрессорных труб

С целью оценки возможности оборудования и совершенствования существующей технологии был проведен ряд исследований по определению зависимости энергосиловых параметров процесса наружной высадки концов труб от условий трения в зоне контакта металла с инструментом. Поскольку формоизменение металла во внешних зонах очага деформации, распределение температур, степени деформации, скорости деформации в процессе наружной высадки являются неизвестными, для проведения теоретического исследования был выбран метод конечных элементов. Программный продукт DEFORM-3D, базирующийся на МКЭ, позволяет путем задания физико-механических свойств материала, различного вида граничных условий, движения инструмента получать значения энергосиловых параметров процессов ОМД [9–11].

Путем создания прототипов инструмента и заготовки, передачи их в DEFORM-3D, проведения необходимых действий по подготовке данных к решению и последовательного решения задач по нагреву заготовки в индукторе, охлаждению при транспортировке на ось пресса, деформации металла при высадке были получены результаты по определению зависимости усилия высадки концов труб из стали 15Х5МФБ при нагреве участка трубы под высадку до значения температуры 1300°C [10] для типоразмеров труб 60,32×4,83, 73,0×7,0, 88,90×6,45 мм. Диапазон изменения показателя трения по Зибелю при этом составил 0,1–1,0. Согласно API-5CT и ГОСТ 633-80 при стандартной длине высаженной части для типоразмеров труб 60,32×4,83, 73,0×7,0, 88,90×6,45 мм длина высаженного участка трубы составляет $101,6_{-25,4}^0$, 95_{min} , $114,6_{-25,4}^0$ мм соответственно. Наружный диаметр высаженной части составляет $65,89_0^{+1,59}$, $78,60_0^{+1,5}$, $95,25_0^{+1,59}$ мм соответственно по указанным типоразмерам. В расчетах приняты номинальные значения размеров.

Анализ полученных результатов

На рис. 2 представлены графики зависимости значений усилия высадки при различных величинах показателя трения для некоторых типоразмеров высаживаемых труб. Как видно из графиков, усилие высадки увеличивается с ростом показателя трения. При изменении показателя трения с 0,1 до 1,0 это увеличение составляет для стандартной высадки концов труб для типоразмера 60,32×4,83 мм – 6,57 раза, для 73,0×7,0 мм – 5,01 раза, для 88,90×6,45 мм – 7,14 раза.

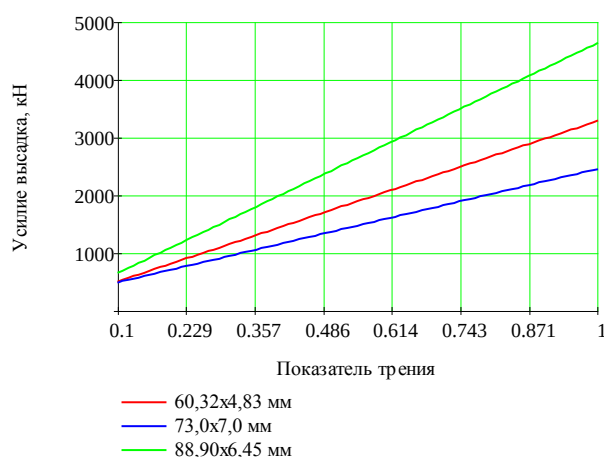


Рис. 2. Зависимость усилия высадки от показателя трения при стандартной высадке

Кроме того, были определены значения усилий высадки при различных сочетаниях условий трения на границах металла с матрицей и металла с пуансоном для рассматриваемых типоразмеров труб (см. таблицу).

Значения усилия высадки при различных условиях трения при стандартной высадке

Типоразмер, мм	Показатель трения на пуансоне $\psi_{\text{пуан}}$	Показатель трения на матрице $\psi_{\text{матр}}$	Усилие высадки, кН
60,32×4,83	0,1	0,1	500
	1,0	0,1	884
	0,5	0,5	1530
	0,1	1,0	1750
	1,0	1,0	3285
73,0×7,0	0,1	0,1	490
	1,0	0,1	1020
	0,5	0,5	1400
	0,1	1,0	2030
	1,0	1,0	2455
88,90×6,45	0,1	0,1	650
	1,0	0,1	1470
	0,5	0,5	2150
	0,1	1,0	3320
	1,0	1,0	4640

Как следует из представленных данных, при значениях показателя трения $\psi_{\text{пуан}} = \psi_{\text{матр}} = 0,1$ получены минимальные значения усилия высадки, равные 500 кН, на типоразмере 60,32×4,83 мм. Максимальные значения усилия высадки, равные 4640 кН при $\psi_{\text{пуан}} = \psi_{\text{матр}} = 1,0$, на типоразмере 88,90×6,45 мм.

При $\psi_{\text{пуан}} = 0,1$ и изменении показателя трения на матрице с $\psi_{\text{матр}} = 0,1$ до $\psi_{\text{матр}} = 1,0$ на типоразмере 88,90×6,45 мм рост усилия высадки составляет 5,11 раза.

При $\psi_{\text{матр}} = 0,1$ и изменении показателя трения

на пуансоне с $\psi_{\text{пуан}}=0,1$ до $\psi_{\text{пуан}}=1,0$ на типоразмере 88,90×6,45 мм рост усилия высадки составляет 2,26 раза.

Аналогичная картина наблюдается в случае разных значений показателей трения на матрице и пуансоне и на типоразмерах труб 60,32×4,83 и 73,0×7,0 мм.

С целью проверки адекватности созданной математической модели процесса наружной высадки концов труб произведен расчет усилия стандартной высадки в DEFORM-3D для типоразмера 73,02×5,51 мм по API-5CT из материала сталь 30Г2. В результате расчета усилия высадки по предлагаемой математической модели получено значение 1440 кН. Путем замеров усилия высадки на прессе SMS Meer ОАО «ПНТЗ» определена величина давления в главном цилиндре прессы. Величина давления составила 147 бар, что соответствует значению усилия высадки 1495 кН. Таким образом, отклонение расчетных и экспериментальных данных составляет 3,7%, что говорит об адекватности созданной математической модели процесса наружной высадки концов труб реальному технологическому процессу.

Заключение

Проведенные исследования влияния условий трения на энергосиловые параметры процесса при наружной высадке концов труб позволяют разработать мероприятия по повышению стойкости инструмента и оборудования для наружной высадки труб и снижению энергосиловых параметров процесса.

Список литературы

1. Грудев А.П., Зильберг Ю.В., Тилик В.Т. Трение и смазки при обработке металлов давлением. М.: Металлургия, 1982. 312 с.
2. Колмогоров Г.Л., Трофимов В.Н., Чернова Т.В. Условия улучшенного (смешанного) режима трения // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. №1. С. 31–33.
3. Совершенствование инструмента и математическое моделирование процесса формирования головок фланцевых болтов / В.И. Кадошников, Е.С. Решетникова, Л.В. Решетников, С.В. Кочуков // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2008. №2. С. 52–56.
4. Раскатов Е.Ю., Лехов О.С. Выбор рациональной калибровки валков пилигримовых станов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. №4. С. 24–27.
5. Шимов Г.В., Буркин С.П. Основы технологических процессов обработки давлением. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. 150 с.
6. Ling K., Liu Y.-K. Study on forming process of the oil pipe with upset ends // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 456. P. 648–651.
7. Yu Y.-Q. Analysis of the tube head upsetting forming process // Petrochemical Equipment. 2015. Vol. 44. P. 58–63.
8. Исследование сопротивления деформации сталей 18ХМФБ и 18ХЗМФБ при горячей деформации / А.В. Коновалов, А.С. Смирнов, А.П. Карамышев, И.И. Некрасов, В.С. Паршин, А.А. Федулов, А.И. Дронов, А.В. Серебряков // Металлург. 2015. №11. С. 110–112.
9. Ишимов А.С., Барышников М.П., Чукин М.В. К вопросу выбора математической функции уравнения состояния для описания реологических свойств стали 20 в процессе горячей пластической деформации // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №1. С. 43–52.
10. Методы исследования механических характеристик металлов и сплавов в процессах обработки давлением с учетом неоднородности структуры / М.П. Барышников, М.В. Чукин, А.Б. Бойко, Х. Дыя, А.Б. Назайбеков // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. №4. С. 26–31.
11. Моделирование в среде DEFORM микроструктуры металлических образцов, подвергнутых интенсивной пластической деформации / М.Ю. Семашко, В.Г. Шеркунов, П.А. Чигинцев // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. №1. С. 57–61.
12. Определение оптимальной скорости движения пуансона в процессе наружной высадки насосно-компрессорных труб / А.П. Карамышев, И.И. Некрасов, В.С. Паршин, А.И. Пугин, А.А. Федулов, А.И. Дронов, В.А. Хорев // Современные металлические материалы и технологии (СММТ'2015): труды междунар. науч.-техн. конференции: в 3 т. Т. 3. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. С. 75–82.

Материал поступил в редакцию 23.05.16.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-4-57-60

LOOKING AT THE RELATIONSHIP BETWEEN THE FRICTION CONDITIONS AND THE ENERGY AND FORCE OF THE EXTERNAL UPSET END PROCESS

Igor Nekrasov – Ph.D. (Eng.), Associate Professor

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia. E-mail: Nekrasovii@yandex.ru

Andrey Karamyshev – Ph.D. (Eng.), Associate Professor

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia. E-mail: andrey.karamyshev@yandex.ru

Vladimir Parshin – D.Sc. (Eng.), Professor

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia. E-mail: Netskater@mail.ru

Artem Fedulov – Ph.D. (Eng.), Associate Professor

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia. E-mail: Artem.feduloff@yandex.ru

Alexey Dronov – Postgraduate Student

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia.

Valeryi Khorev – Postgraduate Student

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia.

Abstract

Problem Statement (Relevance): The external pipe end upset technique is applied for oil well tubing with thicker ends. This article examines the upset process performed by the SMS Meer press running at the PNTZ OJSC site. To obtain reliable data about the process parameters, the process sequence was simulated with the help of the finite-element software package. Three different pipe sizes, which are of most interest to the site, were examined in the case study. **Methods Applied:** 3D-objects were made that imitate the workpiece, the upset die and the complex matrix. Each object was assigned its relevant properties. The simulation was done under given friction conditions, with the objects moving and positioned in space. The varying conditions included friction between the upset die and the workpiece. **Findings:** With the help of the model proposed, dependencies were identified between the upset force and the upset time at different friction factors. The experimental study conducted proves that the model is adequate to the real process. **Practical Relevance:** The values obtained as a result of simulation can be useful in the design of pipe end upset technologies, equipment and tools.

Keywords: External upset process, oil well tubing pipes, mathematical model, upset force, friction factor.

References

1. Grudev A.P., Zilberg Yu.V., Tilik V.T. Friction and lubrication in metal forming. Moscow: Metallurgiya, 1982, 312 p. (In Russ.)
2. Kolmogorov G.L., Trofimov V.N., Chernova T.V. The conditions of an improved (combined) friction regime. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2013, no. 1, pp. 31–33. (In Russ.)
3. Kadoshnikov V.I., Reshetnikova E.S., Reshetnikov L.V., Kochukov S.V. Improved tooling for and improved modelling of the flanged bolt head forming process. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2008, no. 2, pp. 52–56. (In Russ.)
4. Raskatov E.Yu., Lekhov O.S. Choosing the best calibration mode for pilger mill rolls. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2011, no. 4, pp. 24–27. (In Russ.)
5. Shimov G.V., Burkin S.P. Basic metal forming processes. Yekaterinburg: Publishing House of the Ural University, 2014, 150 p. (In Russ.)
6. Ling K., Liu Y.-K. Study on forming process of the oil pipe with upset ends. *Applied Mechanics and Materials*. 2014, vol. 456, pp. 648–651.
7. Yu Y.-Q. Analysis of the tube head upsetting forming process. *Petrochemical Equipment*. 2015, vol. 44, pp. 58–63
8. Konovalov A.V., Smirnov A.S., Karamyshev A.P., Nekrasov I.I., Parshin V.S., Fedulov A.A., Dronov A.I., Serebryakov A.V. Examining the strain resistance of '18ХМФБ' and '18Х3МФБ' steel grades in hot deformation conditions. *Metallurg* [Metallurgist]. 2015, no. 11, pp. 110–112. (In Russ.)
9. Ishimov A.S., Baryshnikov M.P., Chukin M.V. On choosing the mathematical function for the state equation to describe the rheological properties of steel grade 20 under hot plastic deformation conditions. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 1, pp. 43–52. (In Russ.)
10. Baryshnikov M.P., Chukin M.V., Bojko A.B., Dyya H., Nazajbekov A.B. Methods of studying the mechanical properties of metals and alloys undergoing forming processes with due regard to the structural heterogeneity. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2014, no. 4, pp. 26–31. (In Russ.)
11. Semashko M.Yu., Sherkunov V.G., Chigintsev P.A. Microstructural DEFORM modeling of steel samples that were subjected to severe plastic deformation. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2013, no. 1, pp. 57–61. (In Russ.)
12. Karamyshev A. P., Nekrasov I. I., Parshin V. S., Pugin A. I., Fedulov A. A., Dronov A.I., Khorev V.A. Identifying the optimum die speed for external-upset-end tubing production process. *Sovremennye metallicheskie materialy i tekhnologii (SMMT'2015): Trudy mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. [Advanced Metallic Materials and Technologies 2015. Proceedings of the International Scientific Conference]. Saint Petersburg: Publishing House of Peter the Great S.-Petersburg Polytechnic University, 2011, pp. 75–82. (In Russ.)

Received 23/05/16

Исследование влияния условий трения на энергосиловые параметры процесса наружной высадки концов труб / Некрасов И.И., Карамышев А.П., Паршин В.С., Федулов А.А., Дронов А.И., Хорев В.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т.14. №4. С. 57–60. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-4-57-60

Nekrasov I., Karamyshev A., Parshin V., Fedulov A., Dronov A., Khorev V. Looking at the relationship between the friction conditions and the energy and force of the external upset end process. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 4, pp. 57–60. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-4-57-60

ПРОФИЛЬ ХОЛОСТОЙ ЗОНЫ КАЛИБРА СТАНОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ

Курмачев Ю.Ф.

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

Аннотация

В работе рассматривается вопрос о построении плавной кривой, соединяющей начало и конец холостой зоны калибра при заданных начальных условиях. Гипотетически соединить указанные точки можно бесконечным числом способов. Наиболее простыми способами построения такой кривой являются выборы элементарных функций, имеющих точку перегиба на холостом участке. **Актуальным** является улучшение кинематики любого станка обработки калибра, которая наибольшую нагрузку испытывает при прохождении точки перегиба выбранной функции. **Целью работы** является минимизация производной выбранной функции в точке ее перегиба. Кроме того, необходимо минимизировать наибольшее значение такой функции при подходе в точку начала рабочей зоны. В работе используются **математические методы**, в том числе метод итераций, применяемый при вычислении параметров искомой кривой, опирается на теорему Липшица о единственности решения данной задачи. В качестве искомой кривой выбрана косинусоида. Второй кривой, соединяющей указанные точки, является кубическая парабола. Рассматривается максимальная скорость возрастания каждой функции на холостом участке, где возникает наибольшее усилие при движении рабочего кулака на станке ЛЗ-250, и точки максимума обеих кривых на холостой зоне. **Результаты** исследования и численные эксперименты: выбор сделан в пользу кубической параболы, имеющей меньшее максимальное значение, чем у косинусоиды, и меньшее значение производной функции в точке перегиба. **Подобные исследования** с указанием конкретной функции и минимизации усилий при прохождении холостой зоны калибра во время изготовления калибров **проведены впервые**. Указанный метод расчета профиля холостой зоны, рассчитанный соединением точек конца рабочей зоны и ее начала в виде параболы с соответствующими начальными условиями, успешно применен при изготовлении калибров на станке ЛЗ-250 Красноярского металлургического завода. **Практическая значимость** работы заключается в более долговечной эксплуатации дорогостоящего оборудования, в частности шлифовального станка ЛЗ-250.

Ключевые слова: труба, холодная прокатка труб, холостая зона калибра, косинусоида, парабола, расчет, станок ЛЗ-250.

Введение

Из известных технологий получения бесшовных труб из алюминиевых сплавов наиболее перспективной является технология производства холоднодеформируемых труб на пилигримовых станах методом холодной прокатки. В качестве рабочего инструмента применяют калиброванные одноручьевые валки (калибры), вращающиеся в сторону, противоположную подаче в них трубной заготовки. Прокатка трубы ведётся на круглом конусном дорне (оправке), который служит внутренней жёсткой опорой. Основными параметрами рабочего инструмента являются рабочая и холостая зоны валков. При расчёте параметров рабочего инструмента одной из основных задач является расчёт холостой зоны калибра. Эта задача рассматривалась в [1], однако построения холостой зоны по сопряга-

щимся окружностям неоднозначны и рассматриваются предположительно. В работе [2] авторы, предположив в качестве функции, описывающей холостую зону калибра, косинусоиду, недостаточно проанализировали предложенную кривую.

Теория, материалы и методы исследования, технические и технологические разработки

Пусть D, d – наружные диаметры заготовки и готовой трубы соответственно, k – конусность редуцирования по диаметру на участке АБ, равная коэффициенту наклона отрезка $ОО_1$, l – длина холостой зоны. Задача состоит в построении кривой, плавно соединяющей конец рабочей зоны (точку D_1) и начало рабочей зоны (точку A_1). Точки D_1 и A_1 имеют координаты $D_1(0;d)$, $A_1(l;D)$. Значение производной функции, описывающей искомую кривую, в точке A_1 должно быть равно значению конусности редуцирования k , а в точке D_1 – равной нулю (рис. 1).

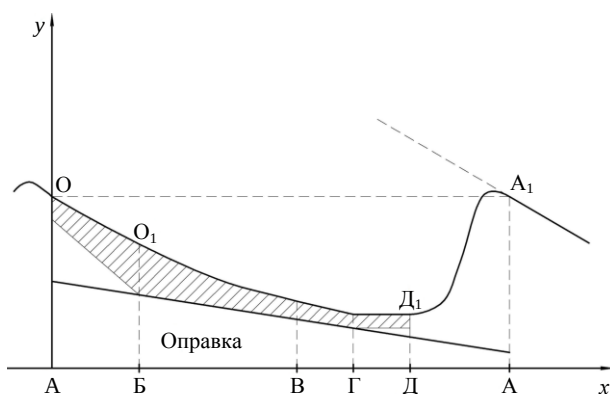


Рис. 1. Схема полной развёртки калибра в прямоугольной системе координат:

АБ-зона редуцирования; БВ-зона обжима; ВГ-зона калибровки по стенке; ГД-калибрующая зона; АД-рабочая зона; ДА-холостая зона

В качестве искомой функции рассмотрим косинусоиду

$$y(x) = -a \cdot \cos(bx) + a + d \quad (1)$$

с неопределёнными коэффициентами $a > 0$, $b > 0$. Согласно начальным условиям

$$y(0) = d, \quad y(l) = D,$$

тогда

$$-a \cdot \cos(bl) + a + d = D.$$

Находим производную функции

$$y'(x) = ab \cdot \sin(bx),$$

согласно условию задачи

$$y'(l) = k$$

или

$$ab \cdot \sin(bl) = k.$$

Условие $y'(0) = 0$ выполняется, кроме того, производная обращается в нуль в точке максимума косинусоиды $y'(x_0) = 0$, то есть

$ab \cdot \sin(bx_0) = 0$. Отсюда $x_0 = \frac{\pi}{b}$. В точке максимума производной возникает наибольшая динамическая нагрузка приводов и узлов станка при выполнении движений холостого хода. Точка максимума производной, в свою очередь, является точкой перегиба косинусоиды, где вторая производная функции равна нулю: $y'' = ab^2 \cdot \cos(bx) = 0$. Тогда $x = \frac{\pi}{2b}$, и макси-

мальное значение производной косинусоиды

$$y'\left(\frac{\pi}{2b}\right) = ab.$$

Система уравнений относительно a и b имеет вид

$$\begin{cases} ab \cdot \sin(bl) = k, \\ a(1 - \cos(bl)) = D - d. \end{cases} \quad (2)$$

Пусть $t = bl$. Из второго уравнения системы (2) находим

$$a = \frac{D - d}{1 - \cos t}, \quad (3)$$

подставим a в первое уравнение системы (2)

$$\frac{(D - d)t}{(1 - \cos t)l} \sin t = k. \quad (4)$$

Из (4) находим

$$t = \frac{c(1 - \cos t)}{\sin t}$$

или

$$t = c \cdot \operatorname{tg} \frac{t}{2},$$

где $c = \frac{kl}{D - d}$. Получили уравнение вида

$$t = \varphi(t). \quad (5)$$

Если функция $\varphi(t)$ удовлетворяет на отрезке $[t_0, t_0 + r]$ условию Липшица

$$|\varphi(t_1) - \varphi(t_2)| \leq \alpha |t_1 - t_2| \quad (6)$$

с постоянной α

$$\alpha = \max_{[t_0, t_0 + r]} |\varphi'(t)|, \quad (7)$$

то согласно теореме о единственности решения [3, 4] уравнение (5) имеет решение

$$t_* = \lim_{n \rightarrow \infty} t_n, \quad (8)$$

где

$$t_n = \varphi(t_{n-1}), \quad n = 1, 2, \dots \quad (9)$$

Находим

$$\varphi(t) = \frac{c(1 - \cos t)}{\sin^2 t}.$$

Потребуем выполнение условия единственности решения (5).

$$0 < \alpha < 1,$$

$$0 \leq \varphi(t_0) - t_0 \leq (1 - \alpha)r.$$

Длина холостой зоны $l \approx 343,1$. В соответствии с технологическими рекомендациями копусность редуцирования по диаметру $-0,14 \leq k \leq 0$, разница между диаметрами заготовки и готовой трубы $30 \leq D - d \leq 40$ мм, поэтому $-1,6 < c < -0,86$. Непосредственными вычислениями получаем

$$t_0 = 5,42, \quad r = 0,75.$$

Таким образом, условия теоремы о существовании единственного решения [3, 4] выполнены, решение уравнения (5) с заданной точностью находим по формуле (9), при этом имеет место оценка

$$|t_n - t_{n-1}| \leq \frac{\alpha}{1 - \alpha} |t_{n-1} - t_{n-2}|, \quad n = 1, 2, \dots$$

Так как $t_n = bl$, то $b = \frac{t_n}{l}$, затем по формуле

(3) находим a . Далее строим полученную косинусоиду (1), соединяющую точки D_1 и A_1 на холостом участке калибра.

Теперь построим кубическую параболу

$$y = ax^3 + bx^2 + cx + d,$$

удовлетворяющую тем же начальным условиям, что и косинусоида: $y(0) = d$, $y(l) = D$, $y'(0) = 0$, $y'(l) = k$.

Так как $y' = 3ax^2 + 2bx + c$ и $y'(0) = 0$ по условию, то $c = 0$. Поэтому парабола имеет вид

$$y = ax^3 + bx^2 + d,$$

где d – диаметр готовой трубы, и

$$y'(l) = 3al^2 + 2bl = k.$$

Таким образом, получена система уравнений относительно a и b :

$$\begin{cases} 3l^2 a + 2lb = k, \\ l^3 a + l^2 b = D - d. \end{cases}$$

Ее решение:

$$a = \frac{kl - 2(D - d)}{l^3},$$

$$b = \frac{-kl + 3(D - d)}{l^2}.$$

Точка максимума производной

$$x = -\frac{b}{3a}$$

или

$$x = \frac{kl - 3(D - d)}{kl - 2(D - d)} \cdot \frac{l}{3}.$$

Точка максимума функции

$$x = -\frac{2b}{3a}$$

или

$$x = \frac{kl - 3(D - d)}{kl - 2(D - d)} \cdot \frac{2l}{3}.$$

При ограничениях $l = 343,1$, $-0,14 \leq k < -0,1$, $50 < d < 90$, $60 < D < 120$ ($d < D$) получаем: на участке $[0; l]$ максимум косинусоиды больше максимума кубической параболы и максимум производной косинусоиды больше максимума производной параболы.

Приведем пример. $D = 84$, $d = 60$, $k = -0,12$. Получаем, что для косинусоиды максимальная скорость изменения кривой равна 0,164 на 297-м градусе, максимум функции равен 88,43 на 339-м градусе. Для кубической параболы максимальная скорость изменения производной равна 0,13 на 300-м градусе, максимум функции равен 86,96 на 344-м градусе.

Результаты исследования и выводы

Так как задача построения холостой зоны калибра состоит в минимизации наибольшего значения функции и производной на участке возрастания функции, то в качестве искомой функции выбираем кубическую параболу. Расчеты по приведенным формулам реализованы на алгоритмическом языке Quick Basic.

Используя предложенную методику расчёта холостой зоны и рекомендации [1], были рассчитаны копиры-кулаки (рис. 2) для станка ЛЗ-250. Холостая (нерабочая) зона калибра соответствует на копире-кулаке сектору между 256-м и 360-м градусами.

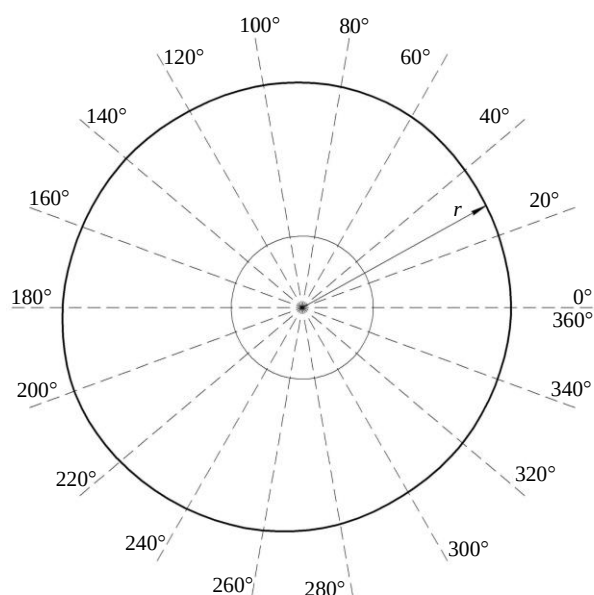


Рис. 2. Кулак врезания (разворота шлифовального круга) станка ЛЗ-250

Практическое применение при шлифовании ручьев калибров на станке ЛЗ-250 в условиях Красноярского металлургического завода по предложенной методике подтвердило полученные теоретические результаты, что позволяет рекомендовать разработки по проектированию профиля холодной зоны в промышленное производство.

Список литературы

1. Курмачёв Ю. Ф., Скоморощенко С. И., Шамраев В. Н. Методика проектирования и изготовление ручья калибров станков ХПТ. Технологическая рекомендация. М.: ВИЛС, 1985. 31 с.
2. Петраков Ю. В., Пасечник В. А., Мартынов Н. А. Проектирование траекторий движений рабочих органов станка с ЧПУ при шлифовании профилей калибров станков холодной прокатки труб // Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2008. №36.
3. Волков Е. А. Численные методы. М.: Наука, 1982. 254 с.
4. Дьяченко В. Ф. Основные понятия вычислительной математики. М.: Наука, 1977. 126 с.
5. Yuri F. Kurmachev, Ruslan E. Sokolov, Denis S. Voroshilov, Vadim M. Bepalov, Vladimir V. Moscvichev. The analytical dependence of the filling billets value to a given relative degree of deformation during cold rolling of tubes // Journal of Siberian Federal University. 2012 5 (7). С. 731–736.
6. Орлов Г.А. Пути совершенствования калибровок инструмента станков холодной прокатки труб // Сталь. 2004. № 12. С. 83–85.
7. Тетерин П.К. Теория периодической прокатки. М.: Металлургия, 1978.
8. Осада Я.Е. Основные вопросы холодной прокатки труб: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Днепропетровск; М., 1947.
9. Целиков А.И., Гришков А.И. Теория прокатки. М.: Металлургия, 1970.
10. Губкин С.И. Пластическая деформация металлов. М.: Металлургияиздат, 1961.

Материал поступил в редакцию 12.05.15.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-4-61-65

GAUGE IDLE ZONE PROFILE IN COLD ROLLING PIPE MILLS

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

Abstract

Problem Statement (Relevance): This paper deals with a problem of building a smooth curve connecting the beginning and the end of the gauge idle zone under predefined initial conditions. Theoretically, there can be an unlimited number of ways to connect the two points. Elementary functions, which have their inflection point in the idle zone, offer the easiest ways of building such a curve. The relevance of this paper includes improved kinematics of a machine-tool used for gauge treatment, which is subject to the greatest load when passing the inflection point. **Objectives:** The objectives of this work include a minimized derivative of the selected function in the inflection point and minimizing the greatest value of the function when it approaches the point where the working area starts. **Methods Applied:** This paper is based on mathematical methods, including the iteration method applied for calculating the parameters of the tar-

get curve. The paper is also based on the Lipchitz theorem stating that this problem can only have one unique solution. Cosinusoid was chosen for the target curve. The second curve that connects the points concerned is a cubic parabola. The paper looks at the maximum velocity with which the function increases in the idle zone, which sees its greatest load when the cam moves in the LZ-250 machine, as well as at the peak points of both curves in the idle zone. **Findings:** Following the findings and the results of numerical experiments, the authors finally chose to use the cubic parabola, as it has a lower maximum value compared with the cosinusoid and a lower value of the derivative function in the inflection point. This appears to be the first research effort that was based on a concrete function and a minimized load present in the idle zone in a gauge treatment operation. The method of calculating the idle zone gauge by connecting the working area start and end points in the form of a parab-

la under relevant initial conditions, has found a successful application in the LZ-250 machine installed at Krasnoyarsk Metallurgical Works. **Practical Relevance:** The practical relevance of this paper includes an extended life of costly machinery, i.e. the LZ-250 machine in this case.

Keywords: Pipe, cold rolling of pipes, gauge idle zone, cosinusoid, parabola, calculation, LZ-250 machine.

References

1. Kurmachev Yu.F., Skomoroshchenko S.I., Shamraev V.N. *Metodika proektirovaniya i izgotovleniya ruchia kalibrov stanov KhPT. Tekhnologicheskaya rekomendatsiya* [The method of designing and manufacturing die grooves for cold pipe mills. Technical recommendations]. Moscow: VILS, 1985, 31 p. (In Russ.)
2. Petrakov Yu.V., Pasechnik V.A., Martynov N.A. Designing CNC machine tool paths for the cold pipe mill groove grinding operation. *Vostochno-evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy* [Eastern European journal of advanced technology]. 2008, no. 36.
3. Volkov E.A. *Chislennye metody* [Numerical methods]. Moscow: Nauka, 1982, 254 p. (In Russ.)
4. D'yachenko V.F. *Osnovnye ponyatiya vychislitel'noy matematiki* [Basic concepts of numerical mathematics]. M.: Nauka, 1977, 126 p. (In Russ.)
5. Yuri F. Kurmachev, Ruslan E. Sokolov, Denis S. Voroshilov, Vadim M. Bepalov, Vladimir V. Moscvichev. The analytical dependence of the filling billets value to a given relative degree of deformation during cold rolling of tubes. *Journal of Siberian Federal University*. 2012 5(7), pp. 731–736.
6. Orlov G.A. Ways of optimising cold pipe mill tool calibration. *Stal'* [Steel], no. 12, 2004, pp. 83–85. (In Russ.)
7. Teterin P.K. *Teoriya periodicheskoy prokatki* [The theory of cold pilger mill technology]. Moscow: Metallurgiya, 1978. (In Russ.)
8. Osada Ya.E. *Osnovnye voprosy kholodnoy prokatki trub: Avtoref. dissertatsii kand. tekhn. nauk* [The fundamental problems of cold pipe mill technology. Extended abstract of Ph.D. dissertation]. Dnepropetrovsk; Moscow: 1947. (In Russ.)
9. Tselikov A.I., Grishkov A.I. *Teoriya prokatki* [The theory of rolling]. Moscow: Metallurgiya, 1970. (In Russ.)
10. Gubkin S.I. *Plasticheskaya deformatsiya metallov* [Plastic deformation of metals]. Moscow: Metallurgizdat, 1961. (In Russ.)

Received 12/05/15

Курмачев Ю.Ф. Профиль холостой зоны калибра станов холодной прокатки труб // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т.14. №4. С. 61–65. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-4-61-65

Kurmachev Yu.F. Gauge idle zone profile in cold rolling pipe mills. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 4, pp. 61–65. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-4-61-65

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ КРУЧЕНИЯ В СПОСОБАХ ПРОИЗВОДСТВА НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ ПРОВОЛОКИ

Усанов М.Ю., Харитонов В.А.

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

Аннотация

Постановка задачи (актуальность работы): для высокого качества проволоки нужно получить равновесное, мелкодисперсное, фрагментированное зерно. Прежде всего на формирование мелкодисперсного зерна влияет характер деформации, т.е. нужно обеспечить немонотонный характер течения. Основной управляемый фактор процессов обработки металлов давлением – это характер деформации и управление характером течения. Круглую проволоку можно получить волочением в монолитной волоке, волочением в роликовых волоках, а также радиально-сдвиговой протяжкой. **Цель работы и используемые методы:** в статье смоделирован процесс волочения в монолитной волоке, в роликовой волоке по системе круг-треугольник-круг и в роликовой волоке радиально-сдвиговой протяжки в программном комплексе Deform-3d. По результатам моделирования проведен анализ очагов деформации в различных сечениях. **Новизна:** произведен анализ напряженного состояния с помощью показателя жесткости. **Результат:** показано, что при волочении в монолитной волоке напряжения сжатия не проникают до центра заготовки, в то время как при волочении в роликовой волоке напряжения сжатия проникают по всему сечению. Напряжения в роликовой волоке радиально-сдвиговой протяжки производят циклическое воздействие на заготовку, что приводит к геликоидальному течению металла. Проанализирован характер течения металла. При волочении в монолитной волоке и роликовой волоке течение имеет монотонный характер. Это связано с малым углом поворота при течении слоев металла. **Практическая значимость:** при радиально-сдвиговой протяжке задействован механизм простого сдвига, что позволяет отнести данный процесс к немонотонным способам ОМД. За счет данного механизма и происходит формирование наноструктуры.

Ключевые слова: волочение, проволока, кручение, моделирование, радиально-сдвиговая протяжка.

Введение

Металлургические предприятия Российской Федерации испытывают сегодня острую потребность в современных технологиях, модернизации оборудования и повышении конкурентоспособности выпускаемой продукции. Особенно остро этот вопрос стоит для чистового передела металлургии – метизного, производящего широкий ассортимент металлургических изделий (метизов) различного назначения. Основным видом метизов как по объему производства, так и применению является проволока и изделия из нее [1].

Свойства проволоки и издержки на ее производство, т.е. по сути ее конкурентоспособность, во многом зависят от уровня требований готовой продукции, определяемых действующей

нормативно-технической документацией и параметрами заготовки-катанки, поступающей в технологический процесс. В итоге же они формируются основными операциями технологического процесса изготовления проволоки, к которым относятся способы ОМД и термическая обработка. Последняя обеспечивает получение необходимых структуры и свойств заготовки и готовой проволоки, а также восстановление деформируемости передельной заготовки. Кроме того, термическая обработка увеличивает время цикла и повышает затраты на изготовление проволоки. Поэтому технологические процессы изготовления проволоки должны проектироваться с минимально необходимым количеством промежуточных термообработок, а задачи свойствообразования, наряду с обязательным формообразованием, должны решать применяемые способы ОМД [2–6].

Для измельчения структуры большое значе-

ние имеет применяемая схема деформирования, зависящая от схемы нагружения, предопределяющей траекторию деформации материала. По длине траектории оценивают степень деформации, по кривизне – характер процесса. Траектория с малой кривизной свойственна монотонным процессам, в которых главная ось тензора деформации (след тензора) не поворачивается относительно координатных осей, связанных с образцом. С увеличением кривизны или изломов траектории немонотонность возрастает [7].

Постановка задачи

В данной работе провели сравнение напряженного состояния в проволоке, полученной волочением в монолитной волоке, в роликовой волоке (по системе калибров круг-треугольник-круг) и радиально-сдвиговой протяжкой (РСПр [8, 9, 10]) в программном комплексе Deform-3d.

Рассматривался вариант деформации круглой заготовки длиной 50 мм и диаметром 16,00 мм на диаметр 14,25 мм. В качестве материала была принята сталь 80Р. Реологическая модель материала заготовки – пластическое тело, количество элементов сетки 69703. При волочении в монолитной волоке коэффициент трения принимался по Кулону, равным 0,08; в остальных процессах – по Зибелю, с величиной 0,08. Полуугол волоки и роликов РСПр – 8 град; диаметр роликов при протяжке – 200 мм; диаметр роликов РСПр – 55 мм.

Для оценки вида напряженного состояния использовался показатель жесткости напряженного состояния [11] по методике, приведенной в работе [12].

$$\eta = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i},$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения; σ_i – интенсивность нормальных напряжений.

Значения показателя жесткости напряженного состояния для различных видов напряженного состояния приведены в **таблице**.

Напряженное состояние	Показатель жесткости напряженного состояния
Одноосное растяжение	1
Чистый сдвиг	0
Одноосное сжатие	–1

Результаты исследования

В результате моделирования получен характер распределения показателя жесткости напря-

женного состояния в очаге деформации. После деформации в продольном сечении заготовки была нанесена координатная сетка с размером ячеек 1×1 мм.

Характер распределения показателя жесткости при волочении в монолитной волоке показан на **рис. 1**.

Из **рис. 1** видно, что длина очага деформации составляет 4,9 мм, при этом деформация сжатия не проникают до центра заготовки, а в ее центре действуют растягивающее напряжение.

На **рис. 2** показан характер распределения показателя жесткости при волочении в роликовой волоке (по системе калибров круг-треугольник-круг).

В данном случае длина очага деформации составляет 11,89 мм. На **рис. 2, а** видно, что под роликами находится деформация сжатия, которая проникает по всему сечению до конца очага деформации (**рис. 2, в, г**). Также можно заметить, что в разъемах роликов присутствуют растягивающие напряжения, которые остаются там на протяжении всего процесса деформирования.

На **рис. 3** показан характер распределения показателя жесткости при протяжке в роликовой волоке радиально-сдвиговой деформации.

Длина очага деформации РСПр составляет 12,07 мм. В данном случае за счет кругового движения инструмента заготовка, проходя через очаг деформации, испытывает циклическую деформацию. Таким образом, под роликами присутствуют сжимающие напряжения, а между роликами – растягивающие. За счет такого характера приложения напряжений сетка, нанесенная в продольном направлении, искажается и превращается в спираль (поэтому видно лишь часть сетки). Деформация растяжения присутствует в центральной части заготовки.

Из представленных результатов моделирования видно, что при волочении в монолитной волоке траектории течения металла изменяются на малый угол (при прохождении зон 1 и 2, **рис. 4**), и при этом не происходит проработка структуры в центре заготовки. С другой стороны, при уменьшении угла монолитной волоки можно добиться полной проработки структуры, однако это приведет к еще меньшим углам траектории течения металла, что не будет способствовать измельчению структуры. Это и происходит при волочении в роликовой волоке. Однако из-за присутствия растягивающих напряжений в местах разъема роликов в заготовке формируется неравномерные остаточные напряжения.

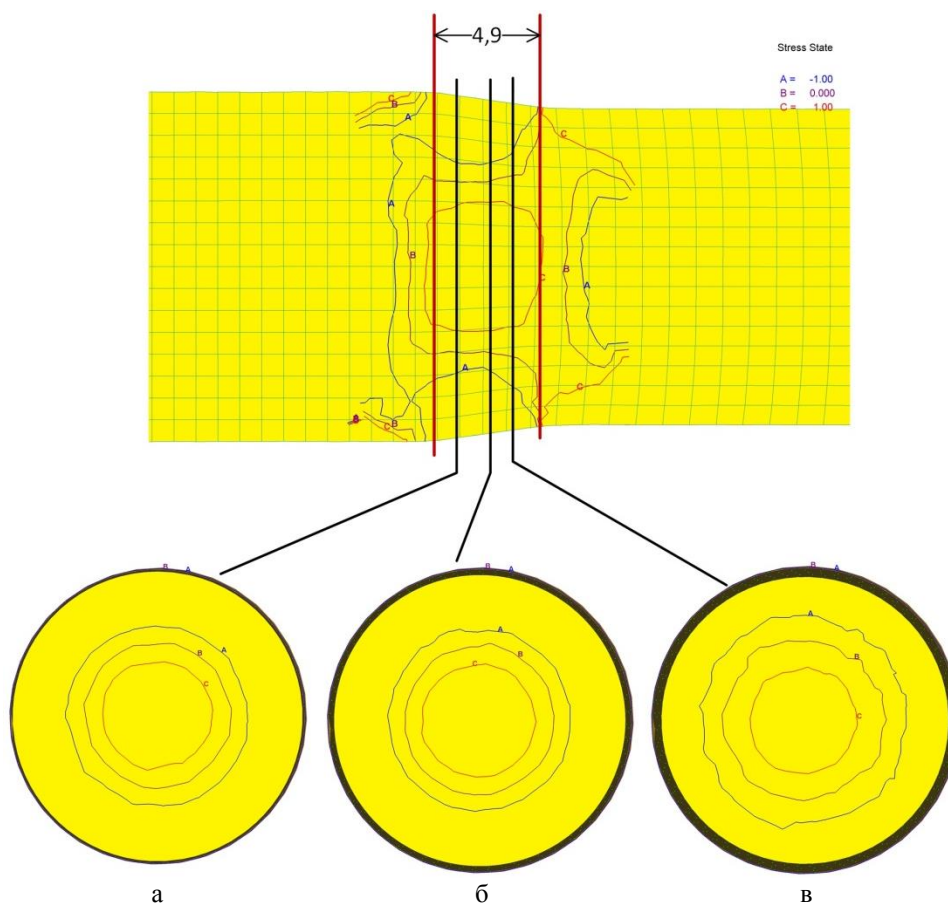


Рис. 1. Характер распределения показателя жесткости при волочении в монолитной волоке

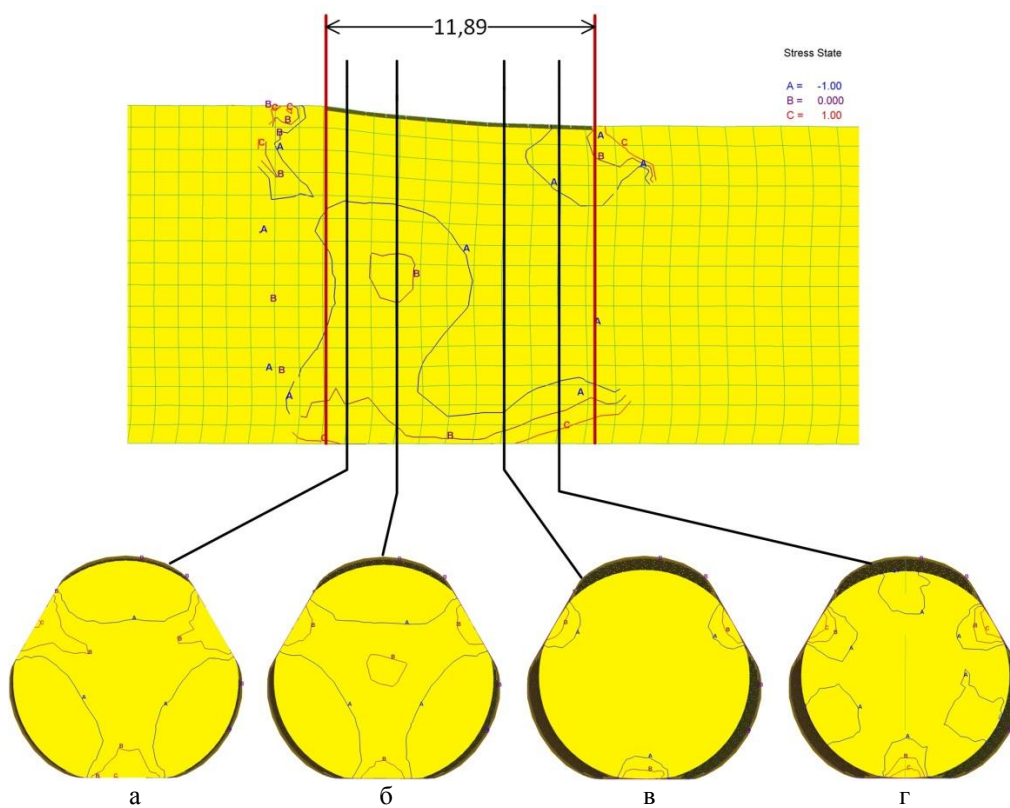


Рис. 2. Характер распределения показателя жесткости при волочении в роликовой волоке

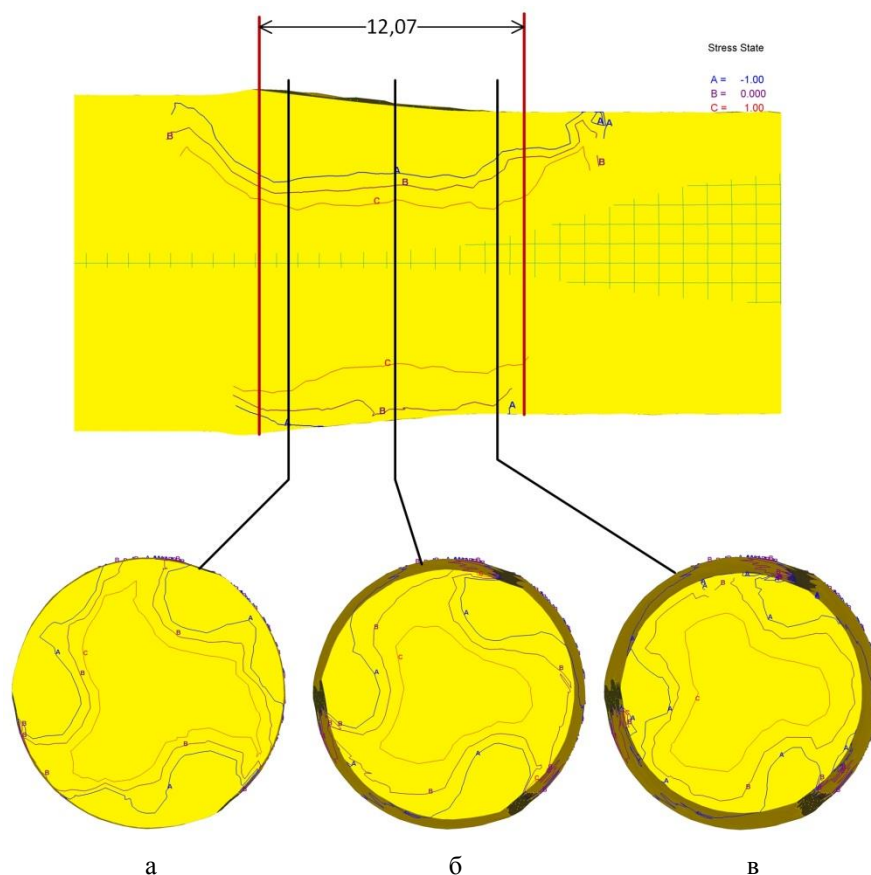
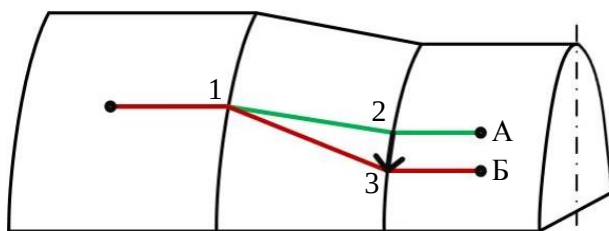


Рис. 3. Характер распределения показателя жесткости при радиально-сдвиговой протяжке

Рис. 4. Характер течения
(А – при волочении в монолитной проволоке;
Б – при радиально-сдвиговой протяжке)

При радиально-сдвиговой протяжке характер течения совсем другой. С одной стороны, происходит вытяжка в продольном направлении, что приводит к малому углу поворота траектории (точки 1 и 2 на **рис. 4**). Однако из-за винтового течения, вызванного напряженным состоянием, соответствующего чистому сдвигу, наблюдается дополнительный поворот от начала очага деформации к концу очага деформации, что значительно увеличивает траекторию течения металла (смещение от точки 2 в точку 3 на **рис. 4**). Это и приводит к интенсивному измельчению структуры.

При выборе способа, обеспечивающего измельчение структуры, следует отдавать предпочтение способам, сочетающим в одном очаге

деформации линейную деформацию вытяжки и деформацию кручения. Одним из способов, сочетающим в одном очаге деформации линейную деформацию вытяжки и деформацию кручения, является радиально-сдвиговая протяжка.

Заключение

С использованием программного комплекса Deform-3d проведен сравнительный анализ напряженного состояния в проволоке из высокоуглеродистой стали при волочении в монолитных проволоках, классических роликовых проволоках и проволоках радиально-сдвиговой протяжки. Для оценки напряженного состояния принят показатель жесткости напряженного состояния.

При волочении в монолитных проволоках наблюдается кольцевой характер распределения напряжений по сечению проволоки. При этом максимальное растягивающее напряжение концентрируется в ее центре.

При волочении в роликовых проволоках наблюдается дискретный характер распределения напряжений. Под роликами действуют преимущественно сжимающие напряжения, в местах разъема роликов – растягивающие.

При радиально-сдвиговой протяжке, за счет циклического действия роликов, под ними действуют сжимающие напряжения, в то время как в центре и пространстве между роликами – растягивающие напряжения. Такой характер напряженного состояния вызывает дополнительную сдвиговую деформацию, увеличивая тем самым степень накопленной деформации, что и обеспечивает получение наноструктуры.

Список литературы

1. Харитонов В.А. Классификация способов ОМД по технологическим признакам при производстве проволоки // 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, 2012. С. 49–59.
2. Lux, R., Kletzin, U., Geinitz, V., Beyer, P. Changes in mechanical parameters of stored patented cold-drawn steel wire // Wire Journal International. Vol. 47, iss. 7, July 2014, pp. 78–83.
3. Yoshida, K., Suga, K., Nakazima, K., Watanabe, K., Umez, K. Processing technology of high dimensional accuracy shaped wire drawing for spring wire // Wire Journal International. Vol. 47, iss. 8, August 2014, pp. 72–75.
4. Yamada, Y. Part 1: Properties of high carbon steel wires drawn at extremely slow speeds // Wire Journal International. Vol. 47, iss. 12, 1 December 2014, pp. 58–64.
5. Yamada, Y. Part 2: Properties of high carbon steel wires drawn at extremely slow speeds // Wire Journal International. Vol. 48, iss. 1, 1 January 2015, pp. 54–59.
6. Galvez, F., Atienza, J.M., Elices, M. Influence of the strain rate on the mechanical response of prestressing steel wires in cold drawing // Wire Journal International. Vol. 47, iss. 10, 1 October 2014, pp. 74–77.
7. Утяшев Ф.З. Современные методы интенсивной пластической деформации: учебное пособие / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. Уфа: УГАТУ, 2008. 313 с.
8. Харитонов В.А., Усанов М.Ю. Состояние и направления развития непрерывных способов наноструктурирования круглой проволоки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. №3. С. 69–73.
9. Харитонов В.А., Усанов М.Ю. Исследование радиально-сдвиговой протяжки проволоки на основе моделирования // Металлург. 2013. № 11. С. 83–87.
10. Kharitonov V.A., Usanov M.Y. Study of Radial-Shear Wire Broaching Based on Modelling // Metallurgist. March 2014, vol. 57, iss. 11, pp. 1015–1021.
11. Колмогоров В.Л. Напряжения, деформации, разрушение. Л.: Металлургия, 1970. 229 с.
12. Шитиков А.А. Совершенствование технологии пневмотермической формовки в состоянии сверхпластичности деталей типа «полусфера»: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2016. 18 с.

Материал поступил в редакцию 30.05.16.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-4-66-71

THE EFFECTIVENESS OF DEFORMATION TORSION FOR THE MANUFACTURE OF UFG STRUCTURED CARBON WIRE

Mikhail Yu. Usanov – Assistant Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: barracuda_m@mail.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5920-3449>

Veniamin A. Kharitonov – Ph.D. (Eng.), Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3487-7110>

Abstract

Problem Statement (Relevance): An equiaxed, finely dispersed and fragmented grain structure is a pre-requisite for high quality steel wire. As the structure is largely influenced by the strain conditions, it is important to ensure a nonmonotonic flow pattern. Deformation type and flow control are the main control factors in metal forming. Thus, round wire can be obtained by drawing in a single-cast die or a roller die or by radial displacement broaching. **Objectives and Methods Applied:** The article examines a model drawing operation performed in a single-cast die, a circle-triangle-circle roller die and in a radial displacement roller die. The models were built with the help of the Deform-3d software package. Based on the modelling results, deformation zones were analysed in a number of cross-sections. **Originality:** The stiffness index was used for the stress state analysis. **Findings:** The authors demonstrate that in the single-cast die drawing operation the compression stress does not reach the centre

of the billet, whereas in the roller die drawing operation the compression stress reaches across the entire cross-section. In the radial displacement roller die, the stress produces a cyclic effect on the billet resulting in a helical flow of metal. The flow patterns were analysed, and it was established that the single-cast die and the roller die processes are both characterized with a monotonic flow, which is due to a small rotation angle. **Practical Relevance:** Radial displacement broaching is based on a simple shear, which refers such drawing operation to nonmonotonic metal forming techniques. It is due to this mechanism that nanostructure is formed.

Keywords: Drawing, wire, torsion, modelling, radial displacement broaching.

References

1. Kharitonov V.A. The classification of metal forming processes in wire production. *Modelirovanie i razvitie processov*

- obrabotki metallov davleniem: mejdunar. sb. nauch. tr. / pod red. V.M. Salganika [Modeling and development of metal forming processes: International research papers]. Ed. by V.M. Salganik. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2012, pp. 49–59. (In Russ.)
2. Lux, R., Kletzin, U., Geinitz, V., Beyer, P. Changes in mechanical parameters of stored patented cold-drawn steel wire. *Wire Journal International*. Vol. 47, iss. 7, July 2014, pp. 78–83.
 3. Yoshida, K., Suga, K., Nakazima, K., Watanabe, K., Umezu, K. Processing technology of high dimensional accuracy shaped wire drawing for spring wire. *Wire Journal International*. Vol. 47, iss. 8, August 2014, pp. 72–75.
 4. Yamada, Y. Part 1: Properties of high carbon steel wires drawn at extremely slow speeds. *Wire Journal International*. Vol. 47, iss. 12, 1 December 2014, pp. 58–64.
 5. Yamada, Y. Part 2: Properties of high carbon steel wires drawn at extremely slow speeds. *Wire Journal International*. Vol. 48, iss. 1, 1 January 2015, pp. 54–59.
 6. Galvez, F., Atienza, J.M., Elices, M. Influence of the strain rate on the mechanical response of prestressing steel wires in cold drawing. *Wire Journal International*. Vol. 47, iss. 10, 1 October 2014, pp. 74–77.
 7. Utyashev F.Z. *Sovremennye metody intensivnoj plasticheskoj deformatsii* [Advanced methods of severe plastic deformation]. Ufa, 2008, 313 p. (In Russ.)
 8. Kharitonov V.A., Usanov M.Yu. The current state and the further development of continuous round wire nanostructuring methods. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2013, no. 3, pp. 69–73. (In Russ.)
 9. Kharitonov V.A., Usanov M.Yu. A study of radial-shear wire broaching based on modelling. *Metallurg* [Metallurgist], 2013, no. 11, pp. 83–87. (In Russ.)
 10. Kharitonov V.A., Usanov M.Yu. Study of Radial-Shear Wire Broaching Based on Modelling. *Metallurgist*, March 2014, vol. 57, iss. 11, pp 1015–1021.
 11. Kolmogorov V.L. *Napryazeniya, deformacii, razrushenie* [Stress, strain, fracture]. Leningrad: Metallurgiya, 1970, 229 p. (In Russ.)
 12. Shitikov A.A. *Sovershenstvovanie tehnologii pnevmotermicheskoi formovki v sostoyanii sverhplasticnosti detalei tipa «polusfera»* [Improving the thermo-pneumatic forming process applicable to hemisphere shaped parts in the superplasticity state. Extended abstract of Ph.D. dissertation]. Moscow, 2016, 18 p. (In Russ.)

Received 30/05/16

Усанов М.Ю., Харитонов В.А. Эффективность применения деформации кручения в способах производства наноструктурированной проволоки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т.14. №4. С. 66–71. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-4-66-71

Usanov M.Yu., Kharitonov V.A. The effectiveness of deformation torsion for the manufacture of ufg structured carbon wire. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 4, pp. 66–71. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-4-66-71

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

УДК 621.785:621.771.23-022.532

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-4-72-75

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОТ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЛИСТОВОГО ПРОКАТА

Чукин М.В.¹, Полецков П.П.¹, Набатчиков Д.Г.¹, Гущина М.С.¹, Алексеев Д.Ю.¹, Хакимуллин К.²¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.² Хосокава Колб GMBH, Бонн, Германия

Аннотация

Постановка задачи: в рамках комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, выполняемого по инициативе Магнитогорского металлургического комбината с участием Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова и Термдеформ-МГТУ, разрабатывается технология производства импортозамещающего наноструктурированного листового проката с уникальным комплексом механических свойств.

Цель работы: исследование зависимости твердости и ударной вязкости от химического состава и режимов термической обработки наноструктурированного высокопрочного листового проката. **Используемые методы:** с использованием оборудования лабораторного комплекса «Термдеформ-МГТУ» проведена выплавка слитков с различными химическими композициями, которые в последующем подвергались горячей деформации и термической обработке по различным режимам. После термической обработки был осуществлен раскрой полученных раскатов для измерения твердости и проведения испытаний на ударный изгиб. Полученные результаты механических испытаний в дальнейшем подвергались статистической обработке. **Новизна** заключается в разработанных для высокопрочного листового проката математических зависимостях твердости и ударной вязкости от химического состава и режимов термической обработки. **Результат:** на основе статистической обработки экспериментальных данных получены уравнения зависимости твердости и ударной вязкости от химического состава и режимов термической обработки высокопрочного листового проката. Также в процессе исследований выявлено, что отпуск высокопрочной стали системы легирования Cr-Ni-Mo-V с 0,3% C в температурном интервале 250–400°C является нежелательным, поскольку в данном диапазоне температур наблюдается развитие необратимой отпускной хрупкости. **Практическая значимость:** с использованием разработанных математических зависимостей возможно создание новых или корректировка действующих технологических режимов производства высокопрочного листового проката.

Ключевые слова: высокопрочная сталь, термическая обработка, твердость, ударная вязкость, статистический анализ.

Работа проведена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, выполняемого с участием российского высшего учебного заведения (договор 02.G25.31.0105).

Введение

В рамках комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, выполняемого по инициативе ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» с участием ФГБОУ ВО

«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» и ООО «Термдеформ-МГТУ» разрабатывается технология производства импортозамещающего наноструктурированного листового проката с уникальным комплексом механических свойств [1, 2]. Целью данного проекта является создание и освоение производства новых наноструктурированных высокопрочных сталей со сложным комплексом свойств.

© Чукин М.В., Полецков П.П., Набатчиков Д.Г., Гущина М.С., Алексеев Д.Ю., Хакимуллин К., 2016

Методика проведения исследований

В процессе реализации проекта в условиях лабораторного комплекса «Термодеформ-МГТУ» были проведены исследования влияния химического состава и температуры отпуска на механические свойства наноструктурированного высокопрочного листового проката системы легирования Cr-Ni-Mo-V [1].

Для этого была произведена выплавка слитков с различными химическими композициями, которые в последующем нагревались в камерной печи ПКМ 3.6.2/12,5 до температуры 1200°C. Далее осуществлялось обжатие слитков с применением гидравлического пресса П6334 (имитация черновой стадии прокатки) и одноклетьевого реверсивного стана горячей прокатки 500 «ДУО» (имитация чистовой стадии прокатки). Термическая обработка раскатов заключалась в закалке и последующем отпуске при температуре 200–600°C [3–5]. После термической обработки были отобраны образцы для измерения твердости и проведения испытаний на ударный изгиб. Измерение твердости проводилось по методу Бринелля с использованием твердо-сплавного шарика по ГОСТ 9012-59. Испытание на ударный изгиб проводилось по ГОСТ 9454-78 на образцах с V-образным концентратором.

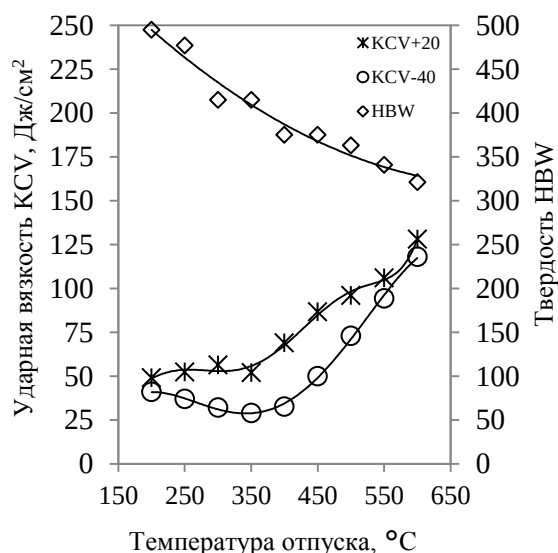
Результаты исследований

В процессе исследований выявлено, что с повышением температуры отпуска с 200 до 600°C ударная вязкость стали KCV⁻⁴⁰ увеличивается на 80 Дж/см², но при этом твердость снижается на 180 HBW (табл. 1). Также при отпуске высокопрочной стали системы легирования Cr-Ni-Mo-V с 0,3% С в температурном интервале 250–400°C наблюдается одновременное падение твердости и ударной вязкости, что свидетельствует о развитии необратимой отпускной хрупкости (см. рисунок). Следовательно, «средний» отпуск для таких сталей не рекомендуется.

Таблица 1

Результаты механических испытаний высокопрочного листового проката системы легирования Cr-Ni-Mo-V с 0,3% С

Температура отпуска, °C	Механические свойства (среднее значение)	
	Твердость HBW	Ударная вязкость, Дж/см ² KCV ⁻⁴⁰
200	495	41
250	477	37
300	415	32
350	415	29
400	375	33
450	375	50
500	363	73
550	341	94
600	321	118



Влияние температуры отпуска на твердость и ударную вязкость наноструктурированного высокопрочного листового проката из стали системы легирования Cr-Ni-Mo-V с 0,30% С

Для получения зависимости механических свойств от химического состава и температуры отпуска был собран массив данных, состоящий из 60 позиций. Далее полученная выборка значений была проверена на однородность методом, рекомендованным Е.Н. Львовским [6, 7]. В случае если $\tau_{\max} > \tau$ [0,001; n-2] элемент выборки признавался аномальным и исключался из массива.

После проверки выборки на однородность был проведен корреляционный анализ [9, 10]. В качестве факторов были рассмотрены следующие параметры: Al, Si, S, P, Ti, Nb, В, $C_{\text{экв}}$ и $T_{\text{отп}}$, а в качестве откликов – твердость (HBW) и ударная вязкость (KCV⁻⁴⁰).

По результатам анализа выявлено, что для отклика HBW значимыми оказались только 2 фактора – углеродный эквивалент $C_{\text{экв}}$ и температура отпуска $T_{\text{отп}}$, а для отклика KCV⁻⁴⁰ значимыми оказались 3 фактора – содержание серы S (% масс.), углеродный эквивалент $C_{\text{экв}}$ и температура отпуска $T_{\text{отп}}$.

Далее на основе полученной информации был проведен множественный регрессионный анализ по откликам HBW и KCV⁻⁴⁰, подсчитаны остатки и проверено отсутствие их автокорреляции по критерию Дарбина-Уотсона [8]. Полученные значения удовлетворяют данному критерию, следовательно, между откликами и факторами существует взаимосвязь, которую с доверительной вероятностью 95% можно аппроксимировать представленными в табл. 2 уравнениями регрессии.

Полученные в результате статистической обработки данных зависимости

Уравнение регрессии	Граничные условия			
	h , мм	$C_{\text{эв}}$	$T_{\text{отп}}$, °C	S , % масс.
$HBW = 180 + 574C + 96Mn + 115(Cr + Mo + V) + 38(Cu + Ni) - 0,38T_{\text{отп}}$	[6–10]	[0,49–0,89]	[25–590]	–
$KCV^{-40} = 76 - 2430S - 70C - 11,7Mn - 14(Cr + Mo + V) - 4,7(Cu + Ni) + 0,05T_{\text{отп}}$	[6–10]	[0,49–0,89]	[25–590]	[0,001–0,009]
$HBW = 264 + 440C + 73Mn + 88(Cr + Mo + V) + 29(Cu + Ni) - 0,35T_{\text{отп}}$	[20–30]	[0,52–0,89]	[25–590]	–
$KCV^{-40} = 136 - 2931S - 139C - 23Mn - 27,8(Cr + Mo + V) - 9,3(Cu + Ni) + 0,05T_{\text{отп}}$	[20–30]	[0,68–0,89]	[25–250]	[0,002–0,009]

Выводы

1. Отпуск в температурном интервале 250–450°C для высокопрочных сталей системы легирования Cr-Ni-Mo-V является нежелательным, поскольку в данном диапазоне температур проявляется необратимая отпускная хрупкость, что приводит к одновременному падению твердости и ударной вязкости стали.

2. Разработаны математические зависимости твердости и ударной вязкости от химического состава и режимов термической обработки, с использованием которых возможно создание новых или корректировка действующих технологических режимов производства высокопрочного листового проката.

Список литературы

1. Анализ технических требований, предъявляемых к наноструктурированному высокопрочному листовому прокату / М.В. Чукин, В.М. Салганик, П.П. Полецков и др. // Обработка сплошных и слоистых материалов. 2014. № 2. С. 19–28.
2. Особенности получения наноструктурированного высокопрочного листового проката / В.М. Салганик, П.П. Полецков, М.С. Гуцина и др. // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. 2015. №1. С. 27–30.
3. Влияние отпуска на механические свойства и микроструктуру высокопрочной низколегированной стали / Янюшев 3. и др. // Металловедение и термическая обработка металлов. 2014. № 2. С. 23–25.
4. M.W. Tong, P.K.C. Venkatsurya, W.H. Zhou. Structure–mechanical property relationship in a high strength microalloyed steel with low yield ratio: The effect of tempering temperature. Materials Science and Engineering, 2014, vol. 609, pp. 209–216.
5. Pradipta Kumar Jena, Ponguru Senthil P., Siva Kumar K. Effect of tempering time on the ballistic performance of a high strength armour steel. Journal of Applied Research and Technology, 2016, vol. 14, pp. 47–53.
6. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул: учеб. пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1988. 239 с.
7. Румянцев М.И., Ручинская Н.А. Статистические методы для обработки и анализа числовой информации, контроля и управления качеством: учеб. пособие. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2008. 207 с.
8. Смирнов Н.В. Дунин-Барковский И.В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. М.: Наука, 1969. 211 с.
9. Минько А.А. Статистический анализ в MS Excel. М.: Изд. Дом «Вильямс», 2004. 448 с.
10. Боровиков В. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере. СПб.: Питер, 2003. 688 с.

Материал поступил в редакцию 12.09.16.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-4-72-75

MATHEMATICAL DEPENDENCES BETWEEN THE MECHANICAL PROPERTIES OF HIGH-STRENGTH ROLLED SHEET STEEL AND ITS CHEMICAL COMPOSITION AND HEAT TREATMENT CONDITIONS

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

Pavel P. Poletskov – D.Sc. (Eng.), Professor
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7(3519)29-85-25. E-mail: pavel_poletskov@mail.ru

Dmitry G. Nabatchikov – Ph.D. (Eng.), Assistant Professor
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7(3519)29-85-25.

Marina S. Gushchina – Master's Student

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Daniil Yu. Alekseev – Postgraduate Student

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: D.U.Alekseev@mail.ru

Konstantin Khakimullin – Project Engineer

Hosokawa kolb, Bonn, Germany (FRG). E-mail: khakimullin@hosokawa-kolb.de, khakimullin.k@gmail.com

Abstract

Problem Statement: As part of the comprehensive project of creating a hi-tech production process, which is carried out by Nosov Magnitogorsk State Technical University together with Termodeform-MGTU LLC at the request of Magnitogorsk Iron and Steel Works, a process is being developed for the production of nanostructured flat rolled products having a unique combination of mechanical properties and capable of substituting similar imported products. **Objectives:** The objective is to look at how the chemical composition and the heat treatment conditions effect the hardness and the impact strength of nanostructured high-strength rolled sheet steel. **Methods Applied:** With the help of the Termodeform-MGTU laboratory facilities, a number of ingots were produced, which had various chemical compositions and which were later exposed to hot deformation and different modes of heat treatment. After the heat treatment, a number of samples were prepared from the sheets for hardness and impact testing. The results of the mechanical tests were then analysed for statistics. **Originality:** The originality of this work includes the mathematical dependences established which show how the chemical composition and the heat treatment conditions can effect the hardness and the impact strength in high-strength rolled sheet steel. **Findings:** Following the statistical analysis of the experimental data, equations were obtained that show how the chemical composition and the heat treatment conditions effect the hardness and the impact strength of high-strength rolled sheet steel. Also, it was found that the temperature range of 250 to 400 °C does not prove to be a good tempering temperature for high-strength Cr-Ni-Mo-V steel with 0.3% of carbon as it can lead to constant temper brittleness. **Practical Relevance:** The mathematical dependences established enable to create new or improve the current high-strength rolled sheet steel production processes.

Keywords: High-strength steel, heat treatment, hardness, toughness, statistical analysis.

This research was conducted as part of the major project aimed at creating a hi-tech production technology and to be implemented in cooperation with a Russian higher education institution (Contract 02.G25.31.0105) with support from the Russian Ministry of Education and Science.

References

1. Chukin M.V., Salganik V.M., Poletskov P.P., Berezhnaya G.A., Gushchina M.S., Kuznetsova A.S., Alekseev D.Y. Analysis of technical requirements applicable to high-strength nanostructured sheet steel. *Obrabotka sploshnykh i sloistykh materialov* [Solid and laminate materials processing]. 2014, no. 2, pp. 19–28. (In Russ.)
2. Salganik V.M., Poletskov P.P., Gushchina M.S., Berezhnaya G.A., Kuznetsova A.S., Stekanov P.A., Alekseev D.Y. Some features of producing high-strength nanostructured sheet steel. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. P.O. Suhogo* [Vestnik of Sukhoy Gomel State Technical University]. 2015, no. 1, pp. 27–30. (In Russ.)
3. Yanyushevich Z. et al. The effect of tempering on the mechanical properties and microstructure of high strength low alloy steel. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Physical metallurgy and heat treatment of metals]. 2014, no. 2, pp. 23–25. (In Russ.)
4. M.W. Tong, P.K.C. Venkatsurya, W.H. Zhou. Structure-mechanical property relationship in a high strength microalloyed steel with low yield ratio: The effect of tempering temperature. *Materials Science and Engineering*, 2014, vol. 609, pp. 209–216.
5. Pradipta Kumar Jena, Ponguru Senthil P., Siva Kumar K. Effect of tempering time on the ballistic performance of a high strength armour steel. *Journal of Applied Research and Technology*, 2016, vol. 14, pp. 47–53.
6. Lvovsky E.N. *Statisticheskie metody postroeniya empiricheskikh formul: Ucheb. posobie dlya vtuzov. 2-e izd., pererab. i dop.* [Statistical methods of building empirical formulae. A guide for technical university students: 2nd ed.: revised and extended]. Moscow: Higher Sk., 1988, 239 p. (In Russ.)
7. Rumyantsev M.I., Ruchinskaya N.A. *Statisticheskie metody dlya obrabotki i analiza chislovoy informatsii, kontrolya i upravleniya kachestvom* [Statistical methods for processing and analysis of numerical information and for control and quality management]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2008, 207 p. (In Russ.)
8. Smirnov N.V., Dunin-Barkovskii I.V. *Kurs teorii veroyatnostey i matematicheskoy statistiki dlya tekhnicheskikh prilozheniy* [A course in the probability theory and mathematical statistics for technical applications]. Moscow: Nauka, 1969, 211 p. (In Russ.)
9. Minko A.A. *Statisticheskii analiz v MS Excel* [The statistical analysis in MS Excel]. Moscow: Williams Publishing House, 2004, 448 p. (In Russ.)
10. Borovikov V. *STATISTICA. Iskustvo analiza dannykh na kompyutere* [STATISTICA. The art on computer analysis of data]. S. Petersburg, 2003, 688 p. (In Russ.)

Received 12/09/16

Математические зависимости механических свойств от химического состава и режимов термической обработки высокопрочного листового проката / Чукин М.В., Полецков П.П., Набатчиков Д.Г., Гушина М.С., Алексеев Д.Ю., Хакимуллин К. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т.14. №4. С. 72–75. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-4-72-75

Chukin M.V., Poletskov P.P., Nabatchikov D.G., Gushchina M.S., Alekseev D.Yu., Khakimullin K. Mathematical dependences between the mechanical properties of high-strength rolled sheet steel and its chemical composition and heat treatment conditions. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 4, pp. 72–75. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-4-72-75

СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

УДК 669.771

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-4-76-84

ФРАКТАЛЬНОСТЬ СТРУКТУР КАК ИНСТРУМЕНТ УПРАВЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯМИ КАЧЕСТВА МЕТАЛЛОПРОДУКЦИИ

Рубин Г.Ш.¹, Голубчик Э.М.¹, Лукьянова К.С.¹, Дья Х.², Стеблянко В.Л.¹

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

² Ченстоховский технологический университет, Ченстохов, Польша

Аннотация

Постановка задачи (актуальность работы): в статье представлено исследование процесса формирования параметра «шероховатость поверхности» в технологической системе и адекватное представление параметров микро топографии поверхности с возможностью прогнозирования его изменчивости. Так как при производстве такой ленты как товарной продукции исключаются операции холодной прокатки, термообработки и последующей финишной обработки в виде дрессировки, то процессы контроля и управления формированием требуемой микро топографии поверхности значительно усложняются, поэтому исследование является весьма актуальной проблемой. **Цель работы:** разработать и апробировать инструмент управления показателем качества «шероховатость поверхности» металлопродукции на основе горячекатаной травленной ленты с применением фрактальной структуры. **Используемые методы:** для решения поставленной задачи проводили исследования на примере горячекатаной травленной ленты из стали марок Ст3 и 08пс производства Магнитогорского металлургического комбината, рассмотрена модель разложения параметра микро топографии поверхности на самоподобные структуры. В основе математического аппарата в модели предложено использовать преобразование Фурье. Учеными Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова предложен новый подход к описанию параметра шероховатости поверхности Ra на основе фрактальной структуры. **Новизна:** к элементам новизны относится применение фрактальной структуры при формировании параметра «шероховатость поверхности» горячекатаной травленной ленты. Результат: показан разработанный и апробированный в виде алгоритма фрактализации параметра «шероховатость поверхности» инструмент управления показателем качества металлопродукции. Доказано, что предложенный подход обеспечивает высокую сходимость расчетных и фактических значений исследуемых параметров. **Практическая значимость:** разработанный подход позволит управлять процессом формирования требуемой микро топографии поверхности металлопродукции.

Ключевые слова: шероховатость поверхности, показатели качества, фрактал, фрактальная структура, преобразование Фурье, травленная стальная лента.

Научная работа проведена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства с участием высшего образовательного учреждения (Договор № 02.G25.31.0178 от 01.12.2015 г.), а также была профинансирована из средств Национального центра исследований и развития Республики Польша в 2013–2016 гг. в рамках проекта прикладных исследований № PBS2/A5/32/2013

Введение

В современной системе отношений «потребитель-производитель» вопросы повышения качества товара являются основополагающими для успешного позиционирования производителя в условиях

быстроменяющегося рынка металлопродукции. При этом в настоящее время достаточно актуальной остается проблема разработки новых подходов к управлению качеством металлопродукции с применением современных систем мониторинга и оценки параметров изделий, а также возможности математического моделирования реальных технологических процессов [1–18].

Достаточно новым видом товарной металло-

© Рубин Г.Ш., Голубчик Э.М., Лукьянова К.С., Дья Х., Стеблянко В.Л., 2016

продукции можно считать стальную горячекатаную травленную ленту с заданным уровнем шероховатости поверхности, применяемую, например, отечественными и зарубежными автопроизводителями для штамповки дисков колес. На сегодняшний день одним из российских лидеров по производству стальной ленты является ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ОАО «ММК»), который представлен широким спектром размерно-марочного сортамента производимой горячекатаной травленной и холоднокатаной ленты, включая упаковочную, а также ленту из высокоуглеродистых и легированных марок стали. Наибольший интерес представляет стальная горячекатаная травленная лента с переносом на нее части свойств холоднокатаной ленты [19–21].

Для данного вида металлопродукции отдельным, достаточно значимым для потребителя, показателем качества выступает состояние поверхности металлопроката, которое определяет его эксплуатационные и потребительские свойства. При этом с учетом технологических особенностей производства товарной горячекатаной травленной ленты в ОАО «ММК», исключая операции холодной прокатки и дрессировки, параметр «шероховатость поверхности» R_a фактически формируется при горячей прокатке подката и при последующем его травлении в линии непрерывно-травильного агрегата (НТА). Таким образом, вопросы формирования нормированного уровня шероховатости поверхности стальной травленной ленты (R_a) в технологической системе ее производства являются весьма актуальными и на сегодняшний день малоизученными.

Шероховатость поверхности можно отнести к параметру, имеющему периодическую повторяемость. В настоящее время существует ряд подходов к научно-практическому анализу данного показателя качества в различных технологических процессах, среди которых наибольшее распространение получили методы сканирующей зондовой микроскопии [22–24]. В то же время известные традиционные подходы к описанию параметров микро топографии поверхности базируются, как правило, на статистических методах в условиях действующего металлургического производства, предполагающих неполноту априорной информации. А так же они адекватно описывают реальный технологический процесс.

В последние годы появились и достаточно активно проводятся исследования поверхности на основе методов фрактальной геометрии, а также механизмов коррозии, которые могут быть эффективно использованы при моделировании инженерных поверхностей [25–33].

Учеными ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» предложен новый научный подход, основанный на представлении показателя качества «шероховатость поверхности» R_a в виде фрактала [34].

Теория, материалы и методы исследования, технические и технологические разработки

В соответствии с ГОСТ 2789-73 «Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики» шероховатость поверхности изображают в виде изломанной линии (рис. 1), имеющей среднее квадратичное отклонение профиля до базовой линии минимальным, и соответственно оценивают данный показатель представленными на рис. 1 параметрами. При этом, согласно указанному ГОСТу, высоту неровностей профиля определяют по абсолютным значениям высот наибольших выступов и глубин наибольших впадин профиля в пределах базовой длины.

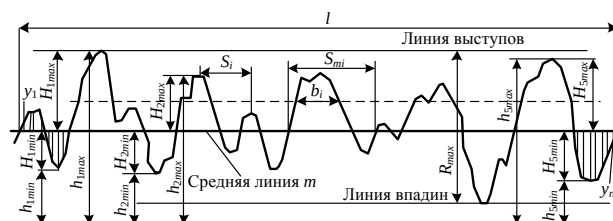


Рис. 1. Профиль шероховатости и его параметры (по ГОСТ 2789-73)

Для разработки инструмента управления таким показателем качества, как «шероховатость поверхности» необходимо данный показатель фрактализовать, т.е. разложить на фракталы. Следует напомнить, что термин «фрактал» обозначает математическое множество, обладающее свойством самоподобия, который был введен Бенуа Мандельбротом. Таким образом, «фрактализовать» означает представить имеющуюся структуру в виде суммы ей подобных путем разложения, где количество фракталов зависит от задаваемой точности.

Если принять во внимание возможность формирования шероховатости не только по номинальному профилю, но и вдоль каждой из образованных впадин и глубин, формирующих шероховатость, то можно получить изображение, представленное на рис. 2.

В соответствии с этим подходом для разложения на фракталы было предложено использовать дискретное преобразование Фурье. Это преобразование используется в анализе линейных систем и применяется к временным рядам для выявления периодических (спектральных) составляющих таких рядов.

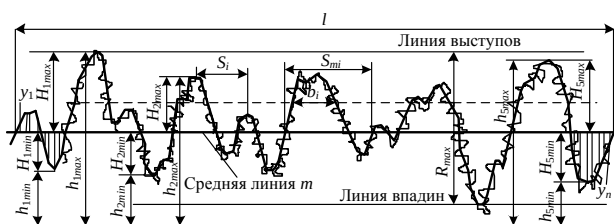


Рис. 2. Профиль шероховатости с фрактальной структурой

Если имеются дискретные наблюдения $y_1, y_2, \dots, y_n$, то прямое дискретное преобразование Фурье выполняется в соответствии с формулой

$$Y_k = \sum_j^n y_j e^{-i \frac{2\pi}{n} jk}, \quad (1)$$

где $k=0, 1, \dots, n-1$.

Результаты преобразования Y_k являются комплексными числами, модуль которых равен амплитуде k -й спектральной составляющей, а аргумент комплексного числа Y_k равен фазе этой гармоники. Аналогично определяется обратное дискретное преобразование Фурье которое преобразует спектральное представление временно-го ряда в действительное.

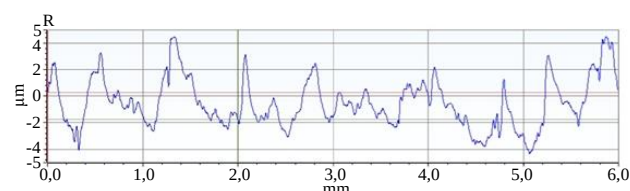
$$y_j = \sum_k^{n-1} Y_k e^{i \frac{2\pi}{n} jk}. \quad (2)$$

Для исследований были отобраны образцы производимой в ОАО «ММК» горячекатаной травленной ленты стали марок 08пс и Ст3. При этом образцы отбирались до и после травления в линии НТА с одного и того же рулона полосы. С полученных образцов были сняты фактические значения параметров шероховатости. Замер шероховатости поверхности производился на стационарном приборе «Профилограф-профилометр HOMMEL-TESTER T8000», а также на переносном приборе Surtronic 25.

Если предположить, что шероховатость поверхности имеет структуру фрактала, то профилограмма поверхности – это графическая сумма всех фракталов. Для того чтобы выделить отдельный элемент фрактала, реальная профилограмма поверхности (**рис. 3, 4**) была разложена на гармоники при помощи дискретного преобразования Фурье.

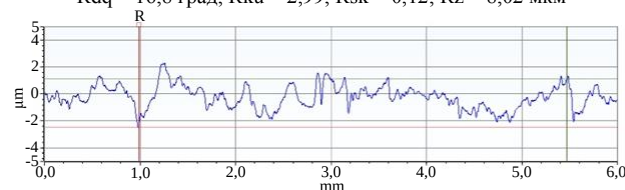
В условиях научно-исследовательского центра «Микротопография» ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» с представленных образцов горячекатаной ленты марки Ст3 и 08пс были сняты данные по шероховатости поверхности в

3D и 2D формате (**рис. 5, 6**) [34–37]. Далее числовые значения были занесены в Microsoft Office Excel. При помощи встроенного пакета «анализ Фурье» были рассчитаны необходимые коэффициенты для дальнейших преобразований. Для расчетов было взято 256 значений, что обусловлено встроенными ограничениями программы анализа: количество обрабатываемых значений должно быть равно 2^n . Пакет «анализ Фурье» выполняет прямое дискретное преобразование согласно формуле (1) и записывает получаемое значение в виде комплексного числа имеющего следующий вид: $Y_k = a + bi$, где a – действительная часть комплексного числа, b – мнимая часть.



Сталь 3 до травления низ

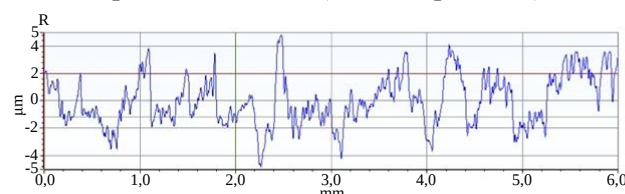
$R_{Pc} = 4,77 \text{ л/см}$; $R_{Sm} = 64,9 \text{ мкм}$; $R_a = 1,23 \text{ мкм}$;
 $R_{dq} = 16,8 \text{ град}$; $R_{ku} = 2,99$; $R_{sk} = 0,12$; $R_z = 8,02 \text{ мкм}$



Сталь 3 до травления верх

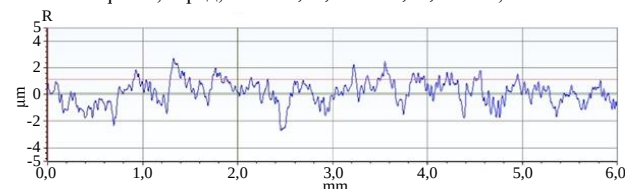
РРс = 5,24 л/см; RSm = 51,3 мкм; Ra = 0,54 мкм;
Rdq = 9,7 град; Rku = 3,25; Rsk = 0,16; Rz = 3,89 мкм

Рис. 3. Профилограммы поверхности исследуемых образцов горячекатаной травленной ленты (сталь марки Ст3)



Сталь 3 после травления низ

RPc = 4,9 л/см; RSm = 63,8 мкм; Ra = 1,21 мкм;
Rdq = 16,7 град; Rku = 2,94; Rsk = 0,08; Rz = 7,79 мкм



Сталь 3 после травления верх

RPc = 8,18 1/см; RSm = 43,9 мкм; Ra = 0,84 мкм;
Rdq = 15,0 град; Rku = 3,26; Rsk = 0,12 Rz = 5,95 мкм

Рис. 4. Профилограммы поверхности исследуемых образцов горячекатаной травленной ленты (сталь марки Ст3)

Для дальнейшего разложения необходимо, используя полученные значения, произвести обратное преобразование Фурье согласно формуле (2), где параметр j будет определять шаг разложения и тем самым характеризовать точность представления показателя шероховатости поверхности.

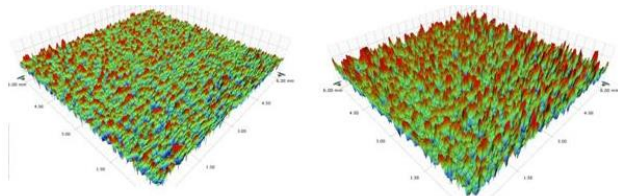


Рис. 5. Карта поверхности горячекатаной ленты марки Ст3

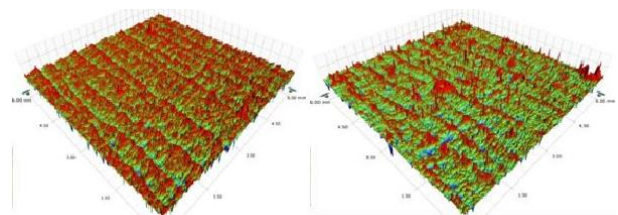


Рис. 6. Карта поверхности горячекатаной ленты марки 08пс

Результаты исследования и их обсуждение

При моделировании и в расчётах было взято 256 входных значений с шагом, равным 1. Прямое дискретное преобразование Фурье позволило выделить действительную и мнимую часть комплексного числа, а обратное дискретное преобразование Фурье с меняющимся порядковым значением гармоники позволило выделять из профилограммы каждую гармонику отдельно (рис. 7, 8).

После преобразования, получив необходимые коэффициенты, для представления гармоник с задаваемой точностью необходимо варьировать шаг (параметр j формулы (2)). Для наглядного представления результата разложения шаг не был изменен (на рис. 7–9 шаг отражен в виде номера представляемой гармоники). На рис. 9 представлена исходная профилограмма шероховатости поверхности с соответствующими номерами гармоник образцов Ст3 и 08пс соответственно. На рисунке отражена самоподобная структура, при каждом последовательном увеличении задаваемой точности, где точность задается варьируемым шагом j (формула (2)). Как видно из рис. 9, исходные значения и сумма гармоник совпадают, что доказывает адекватность предложенной методики на основании преобразования Фурье.

В результате данный подход позволил представить исходную профилограмму в виде самоподобной структуры, что позволяет охарактеризовать показатель шероховатости как фрактальную структуру. Таким образом, показатель качества «шероховатости поверхности» может быть выражен через определенные гармоники, каждая из которых имеет свою амплитуду и частоту, что существенно упрощает, с одной стороны, процесс описания и представления данного параметра, а с другой стороны, появляется возможность прогнозирования и управления показателем в процессе технологического воздействия на поверхность ленты.

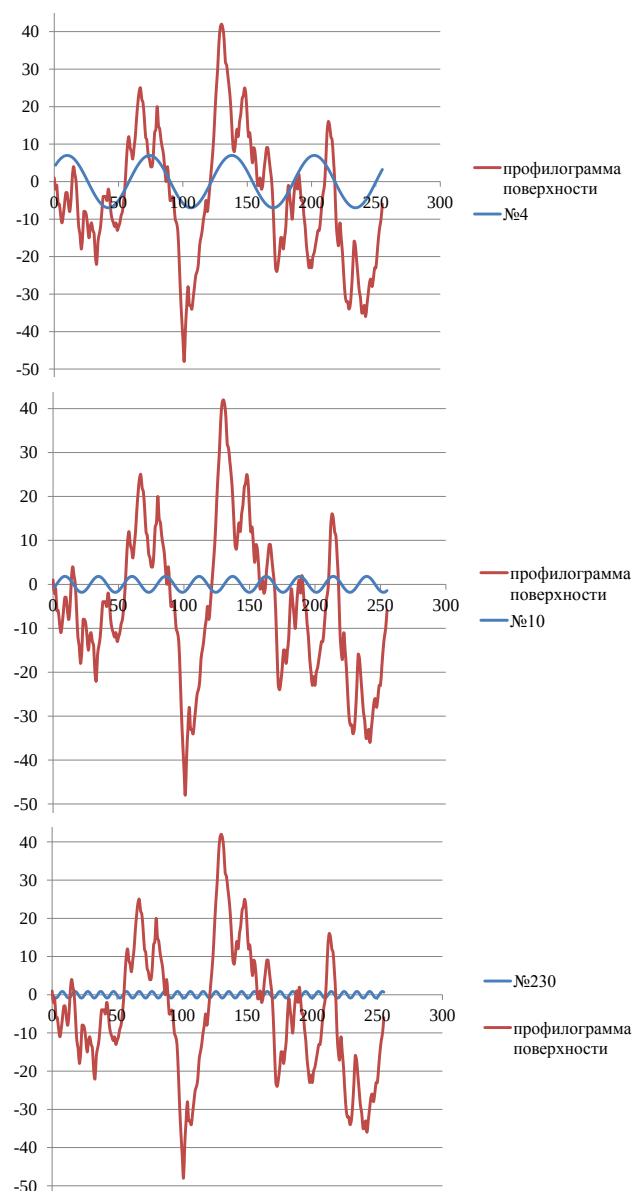


Рис. 7. График шероховатости поверхности с представлением отдельных гармоник на примере горячекатаной травленной ленты из стали марки Ст3

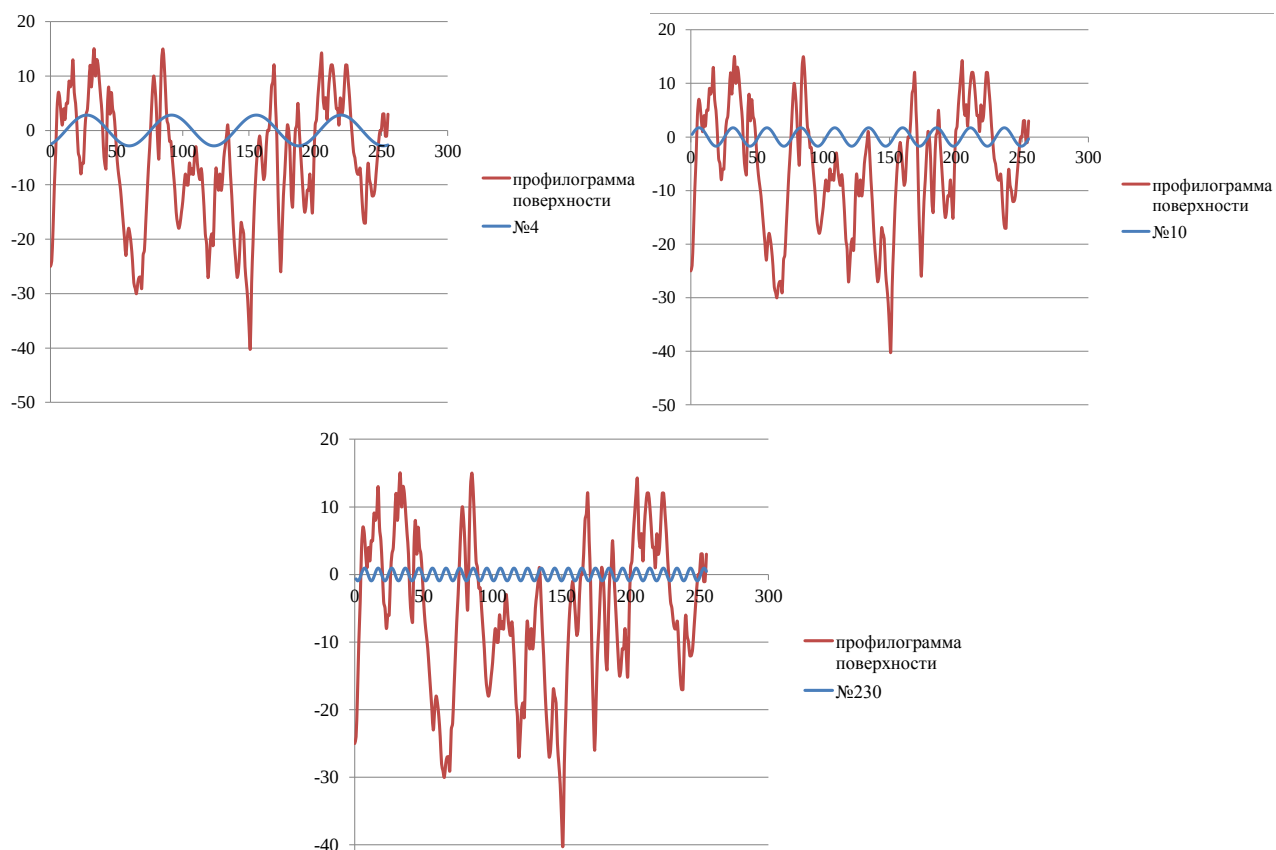


Рис. 8. График шероховатости поверхности с представлением отдельных гармоник на примере горячекатаной травленной ленты из стали марки 08пс

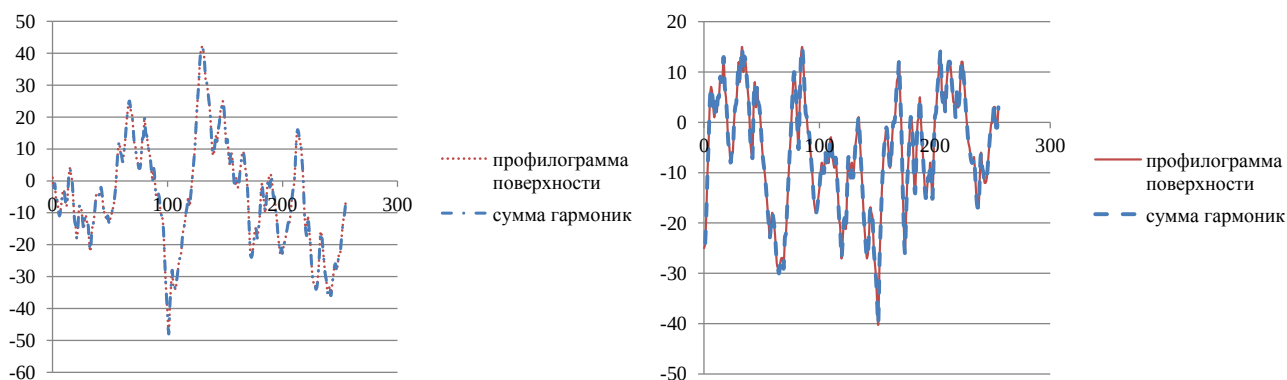


Рис. 9. График шероховатости поверхности с представлением суммы всех гармоник на примере горячекатаной травленной ленты из стали марок Ст3 и 08пс

Заключение

Предлагаемый подход к рассмотрению и описанию параметра «шероховатость поверхности» в виде самоподобных структур на примере стальной горячекатаной травленной ленты открывает новые возможности представления, анализа и управления показателями качества в реальных производственных условиях с возможностью прогнозирования изменчивости данного показателя в процессах технологического воздействия

Список литературы

1. Генезис научных исследований в области качества металлопродукции / Гун Г.С., Мезин И.Ю., Рубин Г.Ш., Минаев А.А., Назайбеков А.Е., Дыя Х. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. №1. С. 92–96.
2. 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. С. 43–47.

3. Голубчик Э.М., Кузнецова А.С., Дья Х. Применение методологии адаптивного управления качеством в процессе объёмной холодной штамповки крепежных изделий из стали с ультрамелкозернистой структурой // *Обработка сплошных и слоистых материалов*. 2014. № 2. С. 32–41.
4. Разработка теории квалиметрии метизного производства / Г.Ш. Рубин, М.В. Чукин, Г.С. Гун, Д.М. Закиров, И.Г. Гун // *Черные металлы*. 2012, июль. С. 15–21.
5. Производство высокопрочной стальной арматуры для железобетонных шпал нового поколения / Чукин М.В., Корчунов А.Г., Бакшинов В.А., Барышников М.П., Гун Г.С., Долгий Д.К., Ефимова Ю.Ю., Колокольцев В.М., Копцева Н.В., Куранов К.Ю., Лебедев В.Н., Мезин И.Ю., Полякова М.А., Чукин В.В.; под общ. ред. М.В. Чукина. Москва, 2014.
6. Актуальные проблемы квалиметрии метизного производства в период зарождения шестого технологического уклада / Гун Г.С., Чукин М.В., Рубин Г.Ш., Мезин И.Ю., Корчунов А.Г. // *Металлург*. 2014. № 4. С. 92–95.
7. 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.
8. Гун Г.С., Чукин М.В., Рубин Г.Ш. // *Управление качеством в метизном производстве*. Металлургические процессы и оборудование. 2013. № 4 (34). С. 106–111.
9. Управление качеством продукции в технологиях метизного производства / Корчунов А.Г., Чукин М.В., Гун Г.С., Полякова М.А. Москва, 2012.
10. Разработка теории квалиметрии метизного производства / Рубин Г.Ш., Чукин М.В., Гун Г.С., Закиров Д.М., Гун И.Г. // *Черные металлы*. 2012. № 7. С. 15–20.
11. 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.
12. 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.
13. Стальная проволока / Белалов Х.Н., Клековкин А.А., Клековкина Н.А., Гун Г.С., Корчунов А.Г., Полякова М.А. Магнитогорск, 2011.
14. 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.
15. Гун Г.С., Чукин М.В. Оптимизация процессов технологического и эксплуатационного деформирования изделий с покрытиями. Магнитогорск, 2006.
16. Производство стальной проволоки / Клековкина Н.А., Клековкин А.А., Никифоров Б.А., Гун Г.С., Корчунов А.Г., Зюзин В.И., Кулеша В.А., Савельев Е.В. Белалов Х.Н. Магнитогорск, 2005.
17. Создание и развитие теории квалиметрии металлургии / Гун Г.С., Рубин Г.Ш., Чукин М.В., Гун И.Г., Мезин И.Ю., Корчунов А.Г. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2003. №5. С. 67.
18. Гун Г.С., Пудов Е.А., Иванова Л.Б. Оптимизация процессов обработки металлов давлением по комплексному критерию качества // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1982. №8. С. 62.
19. Голубчик Э.М. Адаптивное управление качеством металлопродукции // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2014. №1. С. 63–68.
20. Особенности производства горячекатаной травленой ленты с управляемой шероховатостью поверхности / В.Л. Корнилов, В.Е. Телегин, П.Н. Смирнов, Голубчик Э.М. // *Сталь*. 2012. №2. С. 51–52.
21. Исследование возможности создания технологии производства горячекатаной травленой ленты с управляемой шероховатостью поверхности / Голубчик Э.М., Хамутских К.С., Телегин В.Е., Шебаршова И.М., Севастьянов А.Г. // *Производство проката*. 2014. № 11. С. 11–15.
22. Бавыкин О.Б., Вячеславова О.Ф. Комплексная оценка качества поверхности и эксплуатационных свойств изделий из наноматериалов // *Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров: материалы междунар. науч.-техн. конференции Ассоциации автомобильных инженеров (ААИ), посвященной 145-летию МГТУ «МАМИ»*. Москва: Изд-во МГТУ «МАМИ», 2010. Кн. 8. С. 1–5.
23. Мазур И.П. Проблемы контроля качества поверхности при производстве листового проката // *Сталь*. 2011. № 4. С. 31–36.
24. Особенности использования 3D топографических характеристик поверхности в инженерном деле / Белов В.К., Беглецов Д.О., Губарев Е.В., Денисов С.В., Дьякова М.В., Смирнов К.В. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2014. №1. С. 73–80.
25. Потапов А.А., Вячеславова О.Ф., Бавыкин О.Б. Особенности разработки технологического процесса изготовления деталей с применением фрактального анализа поверхностного слоя // *Механические свойства современных конструкционных материалов: сб. материалов*. М.: ИМЕТ РАН, 2012. С. 202–204.
26. Potapov A.A. Application of the Fractal Theory and Scaling Effects During Processing of Low-Contrast Images and Super Weak Signals in the Presence of Intensive Noise // *Тр. 11-й междунар. конф. «Забабахинские научные чтения – 2012», посв. 95-летию со дня рождения академика Е.И. Забахина*. Снежинск: РФЯЦ - ВНИИТФ, 2012. С. 311–312.
27. Генералова А.А. Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя деталей машин на основе оценки его характеристик с применением теории фракталов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Пенза, 2012. 20 с.
28. Золотаревский С. Ю. Обеспечение единства измерений геометрических параметров шероховатости поверхностей в нанометровом диапазоне методами интерферометрии высокого разрешения: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Москва, 2015. 33 с.
29. Тихомиров В.П., Горленко О.А., Измеров М.А. Инженерия фрактальных поверхностей: монография. М.: Машиностроение, 2011. 184 с.
30. T. Blachowicz, K. Cwikiel, M. Binkowski, H. Zghidi. Analysis of the three-dimensional TGS crystal spatial inhomogeneity of the fractal structure // *Chaos, Solitons & Fractals*. Volume 75. June 2015. P. 185–190.
31. Mohamad Ghassem Mahjani, Reza Moshrefi, Ahmad Sharifi-Viand, Ahad Taherzad, Majid Jafarian, Fatemeh Hasanlou, Maryam Hosseini. Surface investigation by electrochemical methods and application of chaos theory and fractal geometry // *Chaos, Solitons & Fractals*. 91. October 2016. P. 598–603.
32. Cho, Y., Shin, J.-H., Costa, A., Kim, T.A., Kunin, V., Li, J., Lee, S.Y., Yang, S., Han, H.N., Choi, I.S., Srolovitz, D.J. Engineering the shape and structure of materials by fractal cut // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. Volume 111. Issue 49. December 2014. P. 17390–17395.
33. Arman, A., Tălu, Ș., Luna, C., Ahmadpourian, A., Naseri, M., Molamohammadi, M. Micromorphology characterization of copper thin films by AFM and fractal analysis // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. Volume 26. Issue 12. December 2015. P. 9630–9639.
34. Лукьянова К.С., Голубчик Э.М., Рубин Г.Ш., Исследование процесса управления качеством горячекатаной травленой ленты на основе фрактальности структуры // *Science Time*. 2015. №3(15). С. 359–362.
35. Исследование изменений 3D-параметров микротопогра-

фии поверхности горячекатаной ленты в процессе травления / Белов В.К., Губарев Е.В., Лукьянова К.С., Голубчик Э.М., Рубин Г.Ш. // Заготовительные производства в машиностроении. 2016. № 3. С. 44–47.

36. Lukyanova K.S., Chukin M.V., Golubchik E.M., Rubin G.Sh. The development of the analysis model for quality indicators of metalware having fractal structure // European Science and

Technology [Text]: materials of the XIII international research and practice conference, Munich, April 20th – 21st, 2016 / publishing office Vela Verlag Waldkraiburg – Munich – Germany, 2016. P. 100–104.

37. Инновационные металлические материалы: монография / под общ. ред. В.М. Колокольцева. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2016. 371 с.

Материал поступил в редакцию 10.10.16.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-4-76-84

FRACTAL STRUCTURES AS A STEEL PRODUCT QUALITY MANAGEMENT TOOL

Gennadij Sh. Rubin – Ph.D. (Eng.), Associate Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: rubin@mgn.ru

Eduard M. Golubchik – D.Sc. (Eng.), Associate Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: golub66@mail.ru

Kseniya S. Lukianova – Postgraduate Student

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: lukks@list.ru

Henrik Dyja – D.Sc. (Eng.), Professor, Director of the Institute of Metal Forming and Engineering Security

Czestochowa University of Technology, Czestochowa, Poland. E-mail: dyja@wip.pcz.pl

Valery L. Steblyanko – D.Sc. (Eng.), Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: v.steblyanko@mail.ru

Abstract

Problem Statement (Relevance): This article presents a study into how the parameter of surface roughness is formed in a technological system and provides an adequate representation of surface microtopography while enabling the prediction of possible changes. As the processes of cold rolling, heat treatment or skin passing are not allowed in strip production, it makes it a much greater challenge to monitor and control the surface microtopography, which presents a very important problem. **Objectives:** The objective is to develop and test a surface roughness management tool based on fractal structure and using hot-rolled pickled strip as a test material. **Methods Applied:** For the purpose of this study, samples of hot-rolled pickled strip of grades St3 and 08ps produced at Magnitogorsk Iron and Steel Works were examined, and the model of surface microtopography decomposed into fractal structures to be studied. It was proposed to apply Fourier transform as part of the the model basis. Scientists from Nosov Magnitogorsk State Technical University offered a new approach to the description of the parameter of surface roughness (Ra) which is based on the fractal structure. **Originality:** One of the original features of this research includes the application of the fractal structure when forming the "surface roughness" parameter for a hot-rolled pickled strip. **Findings:** The authors describe a new quality management tool, which basically is an algorithm for building the fractal structure of the surface roughness parameter. It was

proved that the proposed approach provides a high convergence between calculated and actual values of the studied parameters. **Practical Relevance:** The new approach will enable to obtain the required surface microtopography in steel products.

Keywords: Surface roughness, quality indicators, fractal, fractal structure, Fourier transform, pickled steel strip.

This research was conducted as part of the major project aimed at creating a hi-tech production technology and to be implemented in cooperation with a higher education institution (Contract No. 02.G25.31.0178 dated 01/12/2015) with support from the Russian Ministry of Education and Science. In the period from 2013 to 2016 the project was also funded by the National Centre for Research and Development of the Republic of Poland as part of Applied Research Project No. PBS2/A5/32/2013.

References

1. Gun G.S., Mezin I.Yu., Rubin G.Sh., Minaev A.A., Nazajbekov A.E., Dyja H. The genesis of scientific research in the area of steel product quality. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I.Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2014, vol. 1, pp. 92–96. (In Russ.)
2. Chukin M.V., Golubchik E.M., Gun G.S., Kopceva N.V., Efimova Yu.Yu., Chukin D.M., Matushkin A.N. A study of the physical and mechanical properties and the structure of new generation multifunctional high-strength invar alloys. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I.Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2014, vol. 1, pp. 43–47. (In Russ.)

3. Golubchik E.M., Kuznecova A.S., Dyya H. The application of adaptive quality management techniques in die forging for the production of ultrafine grained steel hardware. *Obrabotka sploshnykh i sloistykh materialov* [The processing of solid materials and composites], 2014, no. 2, pp. 32–41. (In Russ.)
4. Rubin G.Sh., Chukin M.V., Gun G.S., Zakirov D.M., Gun I.G. The development of the qualimetry theory for hardware production. *Chernye metally* [Ferrous metals], July, 2012, pp. 15–21. (In Russ.)
5. Chukin M.V., Korchunov A.G., Bakshinov V.A., Baryshnikov M.P., Gun G.S., Dolgi D.K., Efimova Yu.Yu., Kolokoltsev V.M., Kopceva N.V., Kuranov K.Yu., Lebedev V.N., Mezin I.Yu., Polyakova M.A., Chukin V.V. *Proizvodstvo vysokoprochnoy stalnoy armatury dlya zhelezobetonnykh shpal novogo pokoleniya* [The production of high-strength steel rebars for new generation steel reinforced concrete ties]. Ed. by M.V. Chukin. Moscow, 2014. (In Russ.)
6. Gun G.S., Chukin M.V., Rubin G.Sh., Mezin I.Yu., Korchunov A.G. Some important problems of qualimetry in metalware production at the onset of the sixth technological era. *Metallurg* [Metallurgist], 2014, no. 4, pp. 92–95. (In Russ.)
7. Gun G.S., Mezin I.Yu., Korchunov A.G., Chukin M.V., Gun I.G., Rubin G.Sh. The scientific school of Nosov Magnitogorsk State Technical University in product quality and production process management. *Kachestvo v obrabotke materialov* [Material processing quality], 2014, no. 1, pp. 5–9. (In Russ.)
8. Gun G.S., Chukin M.V., Rubin G.Sh. Quality management in metalware production. *Metallurgicheskie protsessy i oborudovanie* [Metallurgical processes and equipment], 2013, no. 4 (34), pp. 106–111. (In Russ.)
9. Korchunov A.G., Chukin M.V., Gun G.S., Polyakova M.A. *Upravlenie kachestvom produktsii v tekhnologiyakh metiznogo proizvodstva* [Product quality management in metalware production]. Moscow, 2012. (In Russ.)
10. Rubin G.Sh., Chukin M.V., Gun G.S., Zakirov D.M., Gun I.G. The development of the theory of qualimetry for metalware production. *Chernye metally* [Ferrous metals], 2012, no. 7, pp. 15–20. (In Russ.)
11. Chukin M.V., Gun G.S., Korchunov A.G., Polyakova M.A. The potential production of high-strength steel rebars made of high-carbon steel grades. *Chernye metally* [Ferrous metals], 2012, no. 12, pp. 8–16. (In Russ.)
12. Ushakov S.N., Chukin M.V., Gun G.S., Korchunov A.G., Polyakova M.A. High-strength rebars designed for new generation steel reinforced concrete ties. *Put' i putevye khozyaystvo* [Railway track and railway equipment], 2012, no. 11, pp. 25–27. (In Russ.)
13. Belalov Kh.N., Klekovkin A.A., Klekovkina N.A., Gun G.S., Korchunov A.G., Polyakova M.A. *Stalnaya provoloka* [Steel wire]. Magnitogorsk, 2011. (In Russ.)
14. Chukin M.V., Gun G.S., Baryshnikov M.P., Valiev R.Z., Raab G.I. Peculiar 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. (In Russ.)
15. Gun G.S., Chukin M.V. Optimising the deformation processes taking place in coated steel products during production and operation. G.S. Gun, M.V. Chukin; The Ministry of Education of the Russian Federation, the Federal Agency for Education, State Educational Institution of Higher Professional Education Nosov Magnitogorsk State Technical University. Magnitogorsk, 2006. (In Russ.)
16. Klekovkina N.A., Klekovkin A.A., Nikiforov B.A., Gun G.S., Korchunov A.G., Zyuzin V.I., Kulesha V.A., Saveliev E.V., Belalov Kh.N. Steel wire production. The Ministry of Education of the Russian Federation, the Federal Agency for Education, State Educational Institution of Higher Professional Education Nosov Magnitogorsk State Technical University. Magnitogorsk, 2005. (In Russ.)
17. Gun G.S., Rubin G.Sh., Chukin M.V., Gun I.G., Mezin I.Yu., Korchunov A.G. Creating and developing the qualimetry theory of metallurgy. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I.Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2003, no. 5, p. 67. (In Russ.)
18. Gun G.S., Pudov E.A., Ivanova L.B. Optimising metal forming processes based on the overall quality criterion. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya* [Proceedings of Russian Universities. Ferrous metals], 1982, no. 8, p. 62. (In Russ.)
19. Golubchik E.M. Adaptive management of steel product quality. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2014, vol. 1, pp. 63–68. (In Russ.)
20. Kornilov V.L., Telegin V.E., Smirnov P.N., Golubchik E.M. The production of hot-rolled pickled strip with controlled surface roughness. *Stal'* [Steel], 2012, no. 2, pp. 51–52. (In Russ.)
21. Golubchik E.M., Khamutskikh K.S., Telegin V.E., Shebarshova I.M., Sevastyanov A.G. Studying the opportunity of developing a process to produce hot-rolled pickled strip with surface roughness control. *Proizvodstvo prokata* [Rolling], 2014, no. 11, pp. 11–15. (In Russ.)
22. Bavykin O.B., Vyacheslavova O.F. A comprehensive assessment of the surface quality and performance of products made from nanomaterials. *Avtomobile - i traktorostroenie v rossii: prioritety razvitiya i podgotovka kadrov. Materialy mezhdunarodnoy nauch.-tehn. konferentsii Assotsiatsii avtomobilnykh inzhenerov (AAI), posvyaschennoy 145-letiyu MG TU "MAMI"* [The Russian car and tractor industries: Priority development areas and personnel training: Proceedings of the International Scientific Conference organised by the Society of Automotive Engineers to mark the 145th anniversary of the Moscow Polytechnic University]. Moscow: Publishing House of Moscow Polytechnic University, 2010, vol. 8, pp. 1–5. (In Russ.)
23. Mazur I.P. The problems of surface quality control in flat rolling. *Stal'* [Steel], 2011, no. 4, pp. 31–36. (In Russ.)
24. Belov V.K., Begletsov D.O., Gubarev E.V., Denisov S.V., Dyakova M.V., Smirnov K.V. The application of 3D surface topography characteristics in engineering. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2014, vol. 1, pp. 73–80. (In Russ.)
25. Potapov A.A., Vyacheslavova O.F., Bavykin O.B. The development of a part manufacturing process involving the surface layer fractal analysis. *Mekhanicheskie svoystva sovremennykh konstruktivnykh materialov. Sbornik materialov* [The mechanical properties of advanced structural materials: A collection of papers]. M: IMET RAN, 2012, pp. 202–204. (In Russ.)
26. Potapov A.A. Application of the Fractal Theory and Scaling Effects During Processing of Low-Contrast Images and Super Weak Signals in the Presence of Intensive Noise *Tr. 11-y mezhdunar.konf. Zababahinskie nauchnyye chteniya posv. 95-letiyu so dnya rozhdeniya akademika E. I.Zababakhin* [Proceedings of the 11th International Conference "Zababakhin Scientific Readings – 2012" marking the 95th birthday of Academician E.I. Zababakhin]. Snezhinsk: RFYaTs - VNIITF, 2012, pp. 311–312. (In Russ.)
27. Generalova A.A. *Tekhnologicheskoe obespechenie kachestva poverhnostnogo sloya detaley mashin na osnove otsenki ego*

- harakteristik s primeneniem teorii fraktalov: avtoref. diss. kand. tehn. Nauk [Processes ensuring the surface quality of machine parts analysed based on the fractal theory: Extended abstract of Ph.D. dissertation]. Penza, 2012, 20 p. (In Russ.)
28. Zolotarevskiy S.Yu. Obespechenie edinstva izmereniy geometricheskikh parametrov sherohovatosti poverhnostey v nanometrovom diapazone metodami interferometrii vysokogo razresheniya: avtoref. diss. d-r. tehn. Nauk [Ensuring the consistency of surface roughness nanomeasurements by high-resolution interferometry: Extended abstract of Doctoral dissertation]. Moscow, 2015, 33 p. (In Russ.)
 29. Tikhomirov V.P., Gorlenko O.A., Izmerov M.A. *Inzheneriya fraktal'nykh poverhnostey: monografiya* [Fractal surface engineering: Monograph]. Moscow, Mashinostroyeniye, 2011, 184 p. (In Russ.)
 30. T. Blachowicz, K. Cwikiel, M. Binkowski, H. Zghidi. Analysis of the three-dimensional TGS crystal spatial inhomogeneity of the fractal structure. *Chaos, Solitons & Fractals*. Vol. 75, June 2015, pp. 185–190.
 31. Mohamad Ghassem Mahjani, Reza Moshrefi, Ahmad Sharifi-Viand, Ahad Taherzad, Majid Jafarian, Fatemeh Hasanlou, Maryam Hosseini. Surface investigation by electrochemical methods and application of chaos theory and fractal geometry. *Chaos, Solitons & Fractals*. 91, October 2016, pp. 598–603.
 32. Cho, Y., Shin, J.-H., Costa, A., Kim, T.A., Kunin, V., Li, J., Lee, S.Y., Yang, S., Han, H.N., Choi, I.S., Srolovitz, D.J. Engineering the shape and structure of materials by fractal cut. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. Vol. 111, iss. 49, December 2014, pp. 17390–17395.
 33. Arman, A., Tălu, Ș., Luna, C., Ahmadpourian, A., Naseri, M., Molamohammadi, M. Micromorphology characterization of copper thin films by AFM and fractal analysis. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. Vol. 26, iss. 12, December 2015, pp. 9630–9639.
 34. Lukyanova K.S., Golubchik E.M., Rubin G.Sh. The study of the hot-rolled pickled strip quality management process based on the fractal structure. *Science Time*, 2015, no. 3(15), pp. 359–362. (In Russ.)
 35. Belov V.K., Gubarev E.V., Lukyanova K.S., Golubchik E.M., Rubin G.Sh. Studying the changing 3D surface microtopography parameters of hot-rolled strip during a pickling process. *Zagotovitel'nyye proizvodstva v mashinostroyenii* [Blank production in machine industry], 2016, no. 3, pp. 44–47. (In Russ.)
 36. Lukyanova K.S., Chukin M.V., Golubchik E.M., Rubin G.Sh. The development of the analysis model for quality indicators of metalware having fractal structure. *European Science and Technology [Text] : materials of the XIII international research and practice conference, Munich, April 20th – 21st, 2016 / publishing office Vela Verlag Waldkraiburg – Munich – Germany, 2016. pp. 100–104.*
 37. *Innovatsionnye metallicheskie materialy: monografiya* [Innovative metallic materials: Monograph]. Ed. by V.M. Kolokoltsev. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2016, 371 p. (In Russ.)

Received 10/10/16

Фрактальность структур как инструмент управления показателями качества металлопродукции /Рубин Г.Ш., Голубчик Э.М., Лукьянова К.С., Дья Х., Стебляно В.Л. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т.14. №4. С. 76–84. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-4-76-84

Rubin G.Sh., Golubchik E.M., Lukyanova K.S., Dyja H., Steblyanko V.L. Fractal structures as a steel product quality management tool. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 4, pp. 76–84. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-4-76-84

ЭНЕРГЕТИКА МЕТАЛЛУРГИИ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ

УДК 621.74:669.046

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-4-85-95

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ ДУГИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НА СТАЛЬ В ДСП-180 ОАО «ММК»

Рябчикова Е.С., Рябчиков М.Ю., Парсункин Б.Н.

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

Аннотация

Постановка задачи (актуальность работы): в статье предложен способ идентификации глубины мениска, возникающего в жидкой стали под действием электродинамических сил дуги в дуговой сталеплавильной печи переменного тока (ДСП). Информация о глубине мениска может быть полезна при оценке степени экранирования дуги металлом и использоваться при выборе рациональных режимов работы печи. До настоящего времени определение параметров, характеризующих воздействие дуги на металл, требовало проведения затратных экспериментов, поскольку отсутствовали средства их объективного контроля. **Целью работы** является разработка подхода к идентификации таких параметров на базе анализа значительных накопленных объемов данных технологического процесса, функционирующего в обычном режиме. **Используемые методы:** способ идентификации основан на сопоставлении перемещений электродов с изменением электрических параметров печного контура. Рассмотрено решение задачи идентификации на базе различных моделей электрической дуги, основанное на ряде допущений относительно формы образующегося мениска, позволяющих определить электродинамические силы воздействия дуги на сталь. При адаптации моделей использовалась технологическая информация по более чем 300 плавкам. **Новизна:** в работе показана принципиальная возможность использования достаточно простых и грубых моделей взаимодействия электрической дуги переменного тока с расплавом при идентификации глубины мениска на базе данных конкретного процесса, а также разработано необходимое для этого математическое и алгоритмическое обеспечение. **Результаты:** исходя из принятых допущений получено математическое выражение, связывающее усредненную глубину мениска с силой воздействия дуги на металл. Получены зависимости глубины мениска от электрических параметров для условий ДСП-180 ОАО «ММК». **Практическая значимость:** данные о глубине образующегося мениска позволяют оценить степень экранирования дуги в различных режимах работы печи и решать оптимизационные задачи, связанные с распределением энергии дуги. Важной областью применения результатов является возможность изучения возмущений по уровню расплава в печи, что позволяет косвенно оценить особенности движения металла.

Ключевые слова: модель электрической дуги; заглубление дуги в металл; аксиальные электродинамические силы; глубина мениска; столб дуги.

Введение

Совершенствованию режимов работы дуговых сталеплавильных печей переменного тока (ДСП) с целью увеличения производительности и повышения эффективности использования электрической энергии уделено внимание многими исследователями [1–7 и др.].

Один из подходов к оптимизации заключается в поддержании рациональных значений дли-

ны дуги, что позволяет максимизировать производительность, которая зависит от мощности тепловых потерь и мощности, выделяемой в электрической дуге.

Полезная технологическая мощность, передаваемая ванне, отличается от мощности дуг, КПД которых может изменяться в силу таких причин, как: непостоянство степени заглубления дуги в металл; процессы испарения металла при короткой длине дуги; нестабильное качество функционирования системы управления при отработке возму-

щающих воздействий, влияющее на частоту возникновения коротких замыканий и обрывов дуг.

Многообразие процессов, сопровождающих горение электрической дуги переменного тока в электродуговых агрегатах, необходимость выделения существенных факторов, влияющих на процесс горения, приводит к необходимости построения модели электрической дуги, описывающей дуговой разряд с той точки зрения, которая существенна для изучения данного явления [4].

При использовании электрической дуги в качестве источника тепловой энергии в дуговой печи на первое место при построении модели выдвигается учет явлений, связанных с мощностью, выделяемой в дуге, и особенностями ее распределения.

В этой связи интерес представляют геометрические характеристики столба дуги и образующегося мениска, получение информации о которых позволяет моделировать теплообменные процессы в рабочем пространстве печи. Изучению этого вопроса посвящено значительное количество работ [5, 6 и др.].

В [4] указывается чрезвычайная сложность установления связи между внутренними характеристиками дуги, такими как температура, и внешними параметрами, определяющими ее состояние, например геометрией дугового промежутка по результатам отдельных экспериментов. Трудности связаны как со значительной дисперсией получаемых результатов, так и со спецификой проведения экспериментов, которые, как правило, не позволяют в полной мере воссоздать условия, характерные для рабочего пространства действующей мощной электродуговой печи переменного тока.

Для выполнения теплотехнических расчетов представляет интерес получение усредненных оценок параметров модели дуги с учетом влияния на них основных ресурсов управления.

Практическое получение таких оценок теоретически возможно с использованием накопленных данных технологической информации по значениям ключевых технологических параметров действующих электродуговых печей. Значительные сложности связаны с обработкой подобной информации, зашумленной вследствие действия различных возмущений в широком диапазоне частот и обладающей относительно низкой частотой сбора.

Изучение баз данных значений параметров ДСП-180 ОАО «ММК» показало, тем не менее, наличие отдельных периодов плавки, данные

которых могут использоваться для адаптации моделей, учитывающих действие аксиальных электродинамических сил на металл.

Используемые модели

Дуги, горящие в парах металлов, качественно отличаются от дуг, горящих в атмосфере воздуха. При этом меняется характер горения дуги, она превращается из газовой в парогазовую. Такая дуга испускает линейчатое излучение на фоне сплошного спектра – газ дает селективное излучение, атомы металлов – сплошное. В дугах, горящих в парах металлов, интенсивность сплошного излучения значительна и распределение излучения приближается к планковскому, свойственному черному телу.

Можно предположить, что особенности взаимодействия дуг с металлом по-разному влияют на параметры дуг в металлургических печах переменного тока различных типов. Основные причины таких отличий заключаются в наличии различий технологий плавки и мощностей используемых трансформаторов.

Наиболее востребованными в крупном металлургическом производстве дуговыми агрегатами являются дуговые печи переменного тока и агрегаты печь-ковш, позволяющие выполнить доводку физико-химических параметров стали. В этой связи целесообразно рассмотреть возможность адаптации моделей воздействия дуг на металл, разработанных для указанных агрегатов.

Предложенная в [7] модель дуги предполагает, что яркость излучения спадает по мере удаления от оси электродов и дуг. Температура дуги и плотность тока имеют наибольшее значение на оси столба и уменьшаются по мере удаления от нее.

В проводнике с током в результате взаимодействия тока с собственным магнитным полем возникают электромагнитные силы, направленные к оси проводника, вызывающие в точке дуги с радиусом r давление сжатия:

$$f_1 = \mu \frac{I_d^2}{4\pi^2 r_d} \left(1 - \frac{r^2}{r_d^2} \right), \quad (1)$$

где μ – магнитная проницаемость рабочего пространства; I_d – ток дуги; r_d – радиус дуги.

Если предположить, что давление f_1 , передаваясь по длине столба дуги, выразится в давлении на его торцы, то для аксиальной силы F_1 воздействия дуги на металл можно записать [8]:

$$F_1 = \mu \frac{I_d^2}{4\pi^2 r_d} \int_0^{r_d} 2\pi r \left(1 - \frac{r^2}{r_d^2} \right) dr = \mu \frac{I_d^2}{4\pi} \quad (2)$$

Достоинство модели (2) с точки зрения ее последующей адаптации заключается в простоте. Ее недостатком является упрощение процессов, протекающих в дуге, параметры плазмы которой могут быть найдены, исходя из решения задач [9, 10] современной теории низкотемпературной плазмы.

Для оценки возможности использования модели (2) был проведен автоматизированный анализ накопленной в базах информации о заключительных этапах ($\tau > 0,75\tau_n$, где τ_n – продолжительность всего процесса) плавов в ДСП-180 ОАО «ММК». В выборку отбирались параметры режимов до и после перехода на новую ступень напряжения питания печного трансформатора (рис. 1).

При значениях параметров, характерных для периода жидкой ванны, падение напряжения на дуге позволяет оценить предполагаемую длину

дуги исходя из

$$U_d = U_{эл} + \beta L_d, \quad (3)$$

где $U_{эл}$ – падение напряжения в приэлектродных областях, В; β – градиент напряжения дуги (для периода жидкой ванны приняли $\beta = 1,5$ В/мм, $U_{эл} = 10$ В; L_d – длина дуги, мм), и получить оценку изменения глубины мениска

$$dh_m = -dL_3 - dL_d, \quad (4)$$

где dL_3 – перемещение электрода при переходе на новую, продолжительное время поддерживаемую ступень напряжения питания печного трансформатора, мм; dL_d – расчетное изменение длины дуги на основе данных об изменении ее напряжения, мм.

Необходимо отметить, что автоматизированный анализ данных, полученных при работе действующей системы управления, представляет сложную задачу, и его результаты на текущем этапе работ не могут дать достоверные зависимости изменения глубины мениска от средних уровней токов фаз $I_{ср}$ и напряжения питания печного трансформатора $U_{ср}$, а также их изменений dI , dU в процессе перехода на новую ступень.

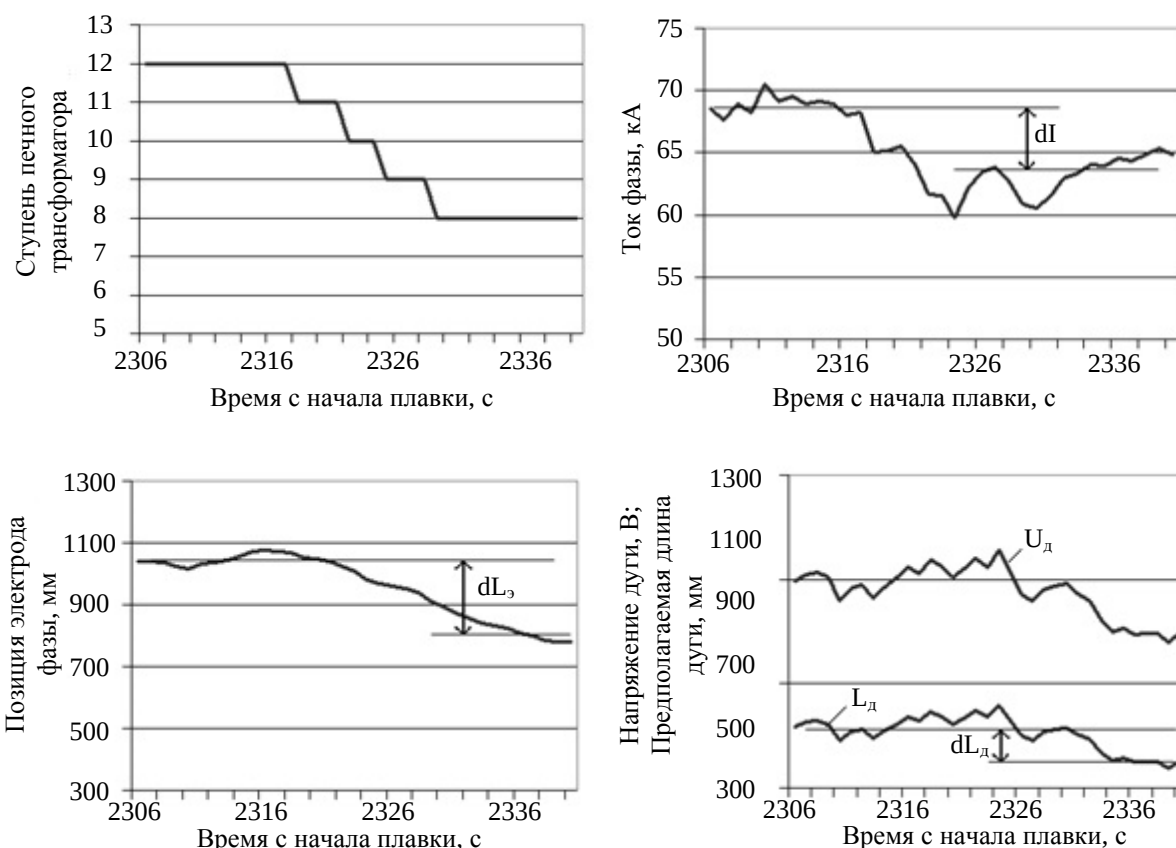


Рис. 1. Пример из изучаемых производственных ситуаций

Тем не менее возможно оценить долю дисперсии dh_m , объясняемой отдельно факторами тока $I_{ср}$, dI и всеми факторами совместно. Коэффициент детерминации для факторов $I_{ср}$, dI составил $R^2 = 0,185$, а для совокупности всех факторов $R^2 = 0,372$.

Полученные данные позволяют предположить влияние на глубину мениска уровня текущего напряжения питания печного трансформатора. В то же время модель (2) не предусматривает подобного, что может быть связано с относительно узким диапазоном токов и напряжений, для которых авторами адаптировалась данная модель.

Возможным решением является модификация (2), позволяющая адаптировать модель, но приводящая к нарушению принятой гипотезы и делающая дальнейший анализ с использованием такой модели качественным. Для этого перейдем к относительному радиусу дуги $r_{отн} = r/r_d$ и коэффициенту n , характеризующему изменение f_1 по радиусу дуги, что позволяет определить среднее по радиусу значение давления интегрированием (1) по $r_{отн}$:

$$f_{1ср} = \mu \frac{I_d^2}{4\pi^2 r_d} \int_0^1 (1 - r_{отн}^n) dr_{отн} = \mu \frac{I_d^2}{4\pi^2 r_d} \cdot \frac{n}{n+1}. \quad (5)$$

Игнорируя далее непостоянство силы по радиусу, ее действие на металл определим как произведение среднего давления на площадь сечения дуги на входе в металл:

$$F_1 = \mu \frac{I_d^2}{4\pi} \cdot \frac{n}{n+1} \cdot r_d. \quad (6)$$

Вектор силы F_1 , предложенный в [6, 7], показан на **рис. 2**. Электромагнитная сила F_1 вызвана эффектом сжатия, который возникает вследствие взаимодействия тока дуги с собственным электромагнитным полем. Электромагнитное поле, создаваемое током, протекающим в жидкой ванне, воздействует на столб дуги силой F_2 , вызывая его выдувание.

По мере роста тока F_2 растет быстрее, чем F_1 , и при условии $F_2 > F_1$ под воздействием электромагнитной силы F_2 дуга будет двигаться со скоростью десятки метров в секунду к краю электрода, причем диаметр столба дуги непрерывно увеличивается, до момента уравнивания действия сил на дугу.

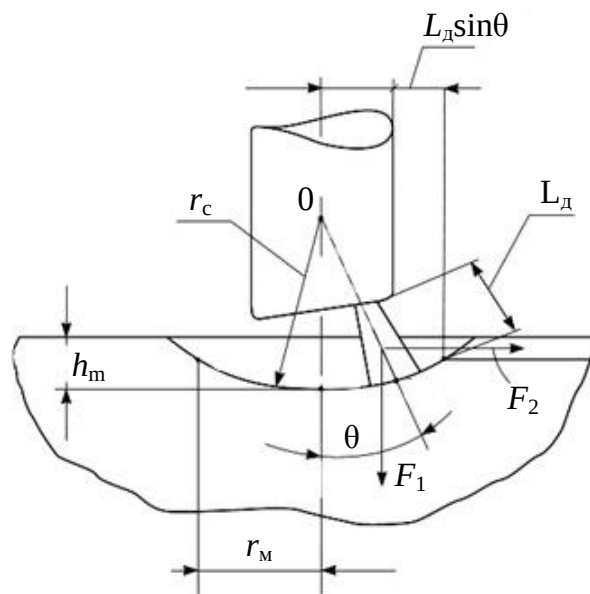


Рис. 2. Действие векторов сил в модели дуги [6]

Приближенно сила F_2 может быть определена в соответствии с выражением

$$F_2 = \mu_n I^2 \frac{L_d}{4\pi h}, \quad (7)$$

где μ_n – магнитная проницаемость плазмы дуги; h – расстояние от электрической оси токопроводящего слоя; L_d – длина дуги.

Учитывая сложности практических расчетов по формуле (7), а также наличие достаточно достоверной экспериментальной информации об углах наклона дуг (для рабочих режимов ДСП составляют 45–65° к оси электрода) зависимость (7) не использовали. Исходя из квадратичного характера зависимостей (5)–(6) от тока приняли:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}(\theta) &= \frac{F_2}{F_1} \approx k \cdot L_d; \\ \theta &= \operatorname{arctg} \left(\operatorname{tg}(65^\circ) \frac{L_d}{0,42} \right) = \\ &= \operatorname{arctg} (5,106 \cdot L_d), \end{aligned} \quad (8)$$

где L_d – длина дуги, мм; 65 – предельный угол наклона, град; 0,42 – предельная длина дуги для рассматриваемого рабочего диапазона токов более 50 кА, получаемая на высшей ступени напряжения питания печного трансформатора 1343В ДСП-180 ОАО «ММК», м.

Допущение (8) позволяет впоследствии свести адаптацию модели (6) к единственному неизвестному фактору – радиусу дуги при контакте с металлом, либо при представлении диаметра дуги в виде

$$d_d = \frac{P_d}{(kE) \cdot \pi \cdot L_d}, \quad (9)$$

где kE – величина, пропорциональная поверхностной плотности излучения дуги; P_d – мощность дуги, к неизвестному фактору kE , связанному с температурой дуги.

В работе [11] указывается, что давление (1) – не единственная причина наличия осевой силы в ДСП постоянного тока (ДСП-ПТ). Дополнительной причиной является прямая полярность дуги ДСП-ПТ из-за большей площади анодного пятна (по причине меньшей плотности тока), когда возникает дополнительная осевая сила, направленная от меньшего сечения (катодное пятно на электроде) к большему (анодное пятно на ванне жидкого металла):

$$F_{k \rightarrow a} = 5 \cdot 10^{-8} I^2 \ln \frac{r_a}{r_k}, \quad (10)$$

где r_a и r_k – радиусы большего и меньшего сечения соответственно.

В работе [12] для расчета аксиальной электродинамической силы в агрегатах переменного тока (печь-ковш) предложено схожее с (10) выражение

$$F_1 = 5 \cdot 10^{-8} I^2 \mu_k \ln \frac{S_a}{S_p}, \quad (11)$$

где I – действующее значение тока дуги, А; μ_k – относительная магнитная проницаемость среды (к моменту окончания расплавления близка к единице); S_a – площадь сечения электрода, см²; S_p – площадь растекания тока в жидкой ванне, см².

В (11) используется параметр, характеризующий растекание тока, который предлагается рассчитать по формулам:

$$\begin{aligned} S_p &= k_p S_d; \\ S_d &= \rho_d L_d / R_d = \pi \cdot r_d^2 \\ \text{или } S_d &\approx 12,2 I, \end{aligned} \quad (12)$$

где ρ_d – удельное сопротивление плазмы дуги, $\rho_d = 1,17 \cdot 10^{-3}$ Ом·м; R_d – сопротивление столба дуги; S_d – площадь сечения дуги; k_p – параметр настройки модели.

Если определить радиус дуги r_d из (12) с использованием модели электрического контура, то параметром адаптации модели (13) является коэффициент k_p , связывающий площади сечения дуги и растекания тока:

$$F_1 = \mu \cdot I^2 \cdot \ln \frac{r_a^2}{k_p \cdot r_d^2}. \quad (13)$$

В модели (5) F_1 рассчитывается, исходя из радиуса дуги r_d , зависимость которого от тока и напряжения дуги следует определить. В модели (13) r_d находим, исходя из (12), а адаптацию модели производим путем поиска зависимости для параметра k_p , характеризующего растекание тока.

В обеих моделях неизвестным является также параметр μ . В [12] указано, что для различных периодов плавки μ может изменяться от уровня магнитной проницаемости вакуума μ_0 до величин, превышающих ее на два порядка. В процессе адаптации целесообразно использовать такие значения μ , при которых получаемые в ходе адаптации значения r_d и k_p будут соответствовать средним теоретическим.

Кроме моделей, определяющих параметры столба дуги, для решения задачи адаптации необходимо задаться параметрами геометрической модели мениска. Это позволяет установить связь между глубиной образующегося мениска и действием электродинамической силы F_1 .

Согласно [13] приняли, что форма мениска соответствует сегменту шара радиусом $r_{ш} = L_3/2 + r_d$. Если в процессе расчетов получаем глубину мениска больше радиуса шара, то форму мениска представляем комбинацией половины шара и цилиндра с общей высотой, равной глубине мениска. Сила Архимеда, определяющая противодействие металла давлению столба дуги, составляет

$$\begin{aligned} P_a &= \rho_c g V_m = \\ &= \rho_c g \left(\frac{1}{3} \pi h_m^2 (3r_{ш} - h_m) \right), \end{aligned} \quad (14)$$

где ρ_c – плотность жидкой стали, принимали равной 6800 кг/м³.

Исходя из условия $P_a = F_1$, получили кубическое уравнение относительно глубины мениска, которое решали методом Виета-Кардано. Искомый корень определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} h_m &= -2 \cdot r_{ш} \times \\ &\times \cos \left(\frac{1}{3} a \cos \left(\frac{3F_1}{2\rho_c g r_{ш}^3} - 1 \right) - \frac{2\pi}{3} \right) + r_{ш}. \end{aligned} \quad (15)$$

Выражение (15) позволяет связать параметры дуги с геометрическими характеристиками мениска, что использовали при адаптации модели на основе информации о перемещениях электродов и изменении контролируемых системой управления ДСП «ARCOS» параметров электрического контура.

Способ адаптации, экспериментальные данные и результаты

При поднятии электрода длина дуги будет увеличиваться, ток снижаться, что приведет к уменьшению высоты мениска (рис. 3). Приближенно данный эффект можно представить системой уравнений

$$\begin{cases} y_1 + L_{\Sigma 1} = y_2 + L_{\Sigma 2} \\ y_1 = x_1 - h_{m1} \\ y_2 = x_2 - h_{m2} \\ \cos(\alpha_1) = x_1 / L_{d1} \\ \cos(\alpha_1) = x_1 / L_{d1} \end{cases} \quad (16)$$

или $\Delta L_d = \Delta h_m - \Delta L_{\Sigma}$;
 $\Delta L_d = l_1 \cos(\alpha_1) - l_2 \cos(\alpha_2)$,

где h_m – глубина мениска, мм; ΔI – изменение силы тока дуги, кА; ΔL_d – изменение вертикальной составляющей длины дуги, мм; ΔL_{Σ} – перемещение электрода, мм; α – угол наклона дуги к оси электрода.

Учитывая, что зависимость глубины мениска от тока близка к линейной [13–15], можно, не используя модель (15), принять $\Delta h_m = \Delta I \cdot k_m$, откуда после преобразований получим

$$\frac{\Delta I}{\Delta L_{\Sigma}} = \frac{1}{k_m - \frac{1}{\Delta I / \Delta L_d}}, \quad (17)$$

где k_m – коэффициент пропорциональности, мм/кА.

Во многих работах указывается чрезвычайная сложность определения фактической длины дуги и зависимости от нее действующих значений тока и напряжения дуги, которую действительно практически сложно измерить [14, 15].

На действующей печи теоретически доступным для контроля является отношение $\Delta I / \Delta L_{\Sigma}$, однако нужно учитывать, что прямое создание статистической модели или использование данных процесса по перемещениям электрода и изменениям тока дуги невозможно в силу действия на процесс различных возмущений, параметры влияния которых неизвестны. Нет данных и о том, какая часть величины изменения тока дуги связана с перемещением электрода, а какая часть связана с действием возмущений, которые компенсируются действующими регуляторами системы ARCOS, используемой в ОАО «ММК».

Учитывая непрерывное действие на процесс возмущений, оперативный контроль $\Delta I / \Delta L$ затруднен в любой момент плавки за исключением периода окончания подачи энергии, когда происходит гашение дуги. В эти периоды времени электроды поднимаются, вследствие чего электрическая дуга угасает.

В результате обработки экспериментальных данных по поднятиям электродов за 349 плавов были получены усредненные значения $\Delta I / \Delta L_{\Sigma}$ для различных режимов работы печи (на рис. 4 показаны для рабочего диапазона токов).

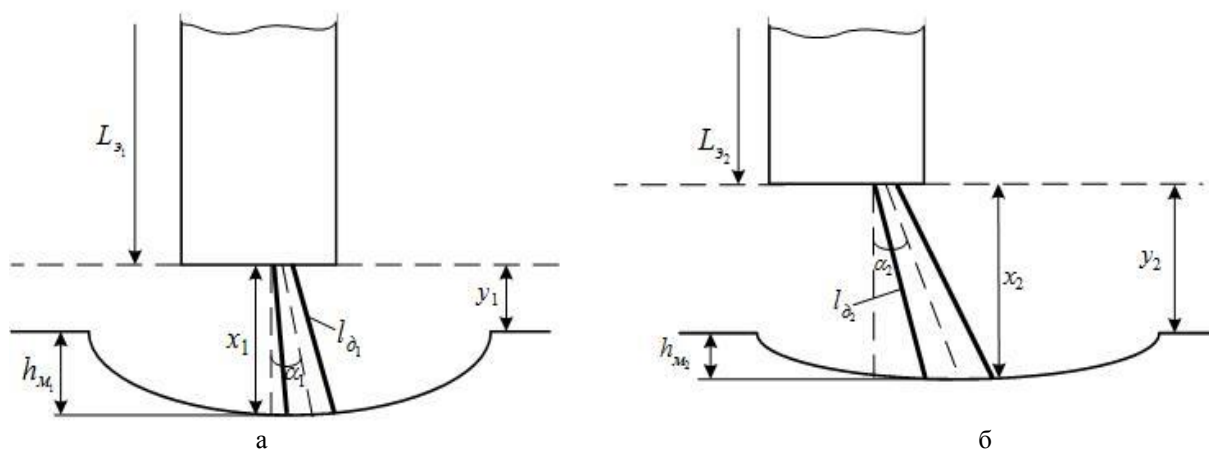


Рис. 3. Изменение глубины мениска, длины дуги и угла наклона при перемещении электрода: а – до перемещения вверх; б – после перемещения вверх

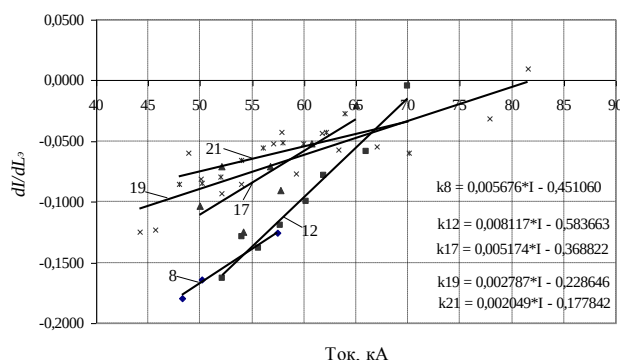


Рис. 4. Экспериментальные зависимости $\Delta I/\Delta L_d$ от тока для области рабочих токов, аппроксимированные линейными зависимостями (подписи кривых соответствуют номеру ступени напряжения питания печного трансформатора ДСП-180)

На рис. 5 представлены полученные с применением модели электрического контура зависимости $\Delta I/\Delta L_d$ от тока для случая одновременного изменения длины дуги на одинаковую величину по каждой фазе при значениях параметров, характерных для периода жидкой ванны.

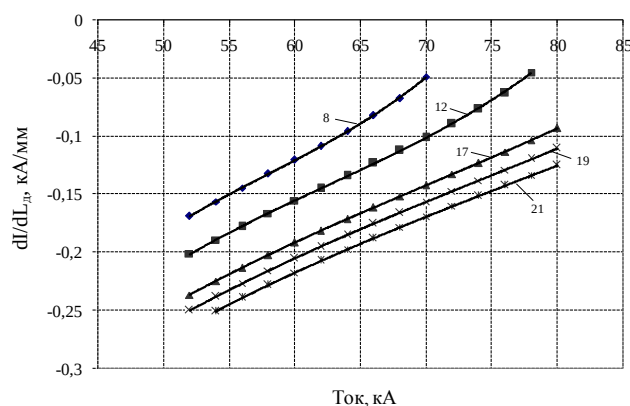


Рис. 5. Рассчитанные с применением модели зависимости $\Delta I/\Delta L_d$ от тока для области рабочих токов (подписи кривых соответствуют номеру ступени)

Используя экспериментальные данные, зависимость (17) и характеристики, определенные с использованием модели электрического контура [16] (см. рис. 5), получили статистическое выражение для расчета коэффициента k_m как функцию от тока дуги I и напряжения дуги U вида

$$k_m = K_y \cdot (a_1 I \cdot 10^{-4} + a_2 U \cdot 10^{-2} + a_3 IU \cdot 10^{-6} + a_4 (I \cdot 10^{-4})^2 + a_5 (U \cdot 10^{-2})^2 + a_6 \cdot 10^2). \quad (19)$$

В форме, аналогичной (19), были представлены параметры адаптации моделей (6) и (13). Результаты расчета коэффициентов a_1 – a_6 для различных моделей приведены в таблице. Также в таблице показаны значения μ , при которых параметры адаптации в среднем соответствуют теоретическим данным.

Зависимости параметров адаптации моделей от тока и напряжения дуги

Параметр адаптации	I	U	IU	I^2	U^2	a_6	K_y	μ , Гн/м	n
k_m , формула (17)	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5				
k_m , формула (17)	-9193	-1856	228	791	109	274	0,01	–	–
kE , формула (6)	-10,83	-7,37	0,8	0,51	0,2	0,55	10^8	$1 \cdot 10^{-4}$	2
k_p , формула (13)	-704,3	-411,1	41,3	33,3	9,54	36,6	0,01	$2 \cdot 10^{-6}$	–

Найденные зависимости k_m , kE , k_p от тока при различных значениях напряжения питания печного трансформатора гомоскедастичны и обеспечивают коэффициенты корреляции с экспериментальными данными более 0,95. Результаты настройки позволяют оценить глубину мениска, образующегося под действием дуги (рис. 6–8).

Для уровня напряжения питания 900–1100 В среднее значение коэффициента k_m находится на уровне 2–5 (см. рис. 6), что в целом соответствует результатам работ [14, 15], в которых проводились испытания на печах с менее мощным по сравнению с ДСП-180 трансформатором.

Для модели (13) полученные значения коэффициента k_p (см. рис. 7) соответствуют данным авторов [12], в которых среднее значение параметра k_p находится на уровне 2–3.

Для модели (6) полученные результаты адаптации нельзя в полной мере интерпретировать как оценки радиуса дуги r_d вследствие принятых допущений. Тем не менее получено (см. рис. 8), что минимуму критерия отклонения расчетных данных от экспериментальных соответствуют диаметры дуг порядка 0,15–0,7 м. В работе [6] указано, что при горении дуги в парах железа средний диаметр дуги равен или чуть больше диаметра электрода, то есть должен составлять порядка 0,6 м.

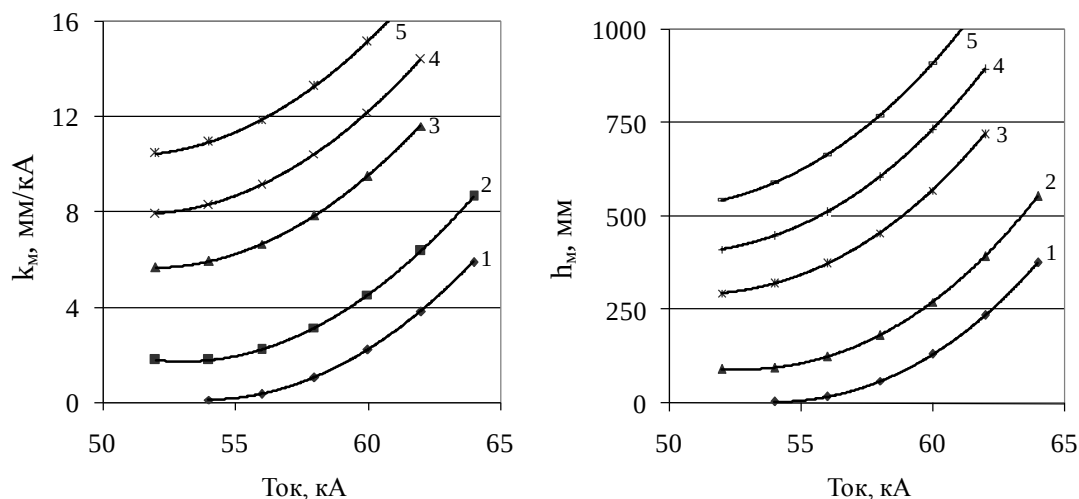


Рис. 6. Зависимости параметра адаптации k_M и глубины мениска h_M от тока и напряжения питания печного трансформатора для упрощенной модели (13): 1 – 991 В; 2 – 1100 В; 3 – 1235 В; 4 – 1290 В; 5 – 1343 В

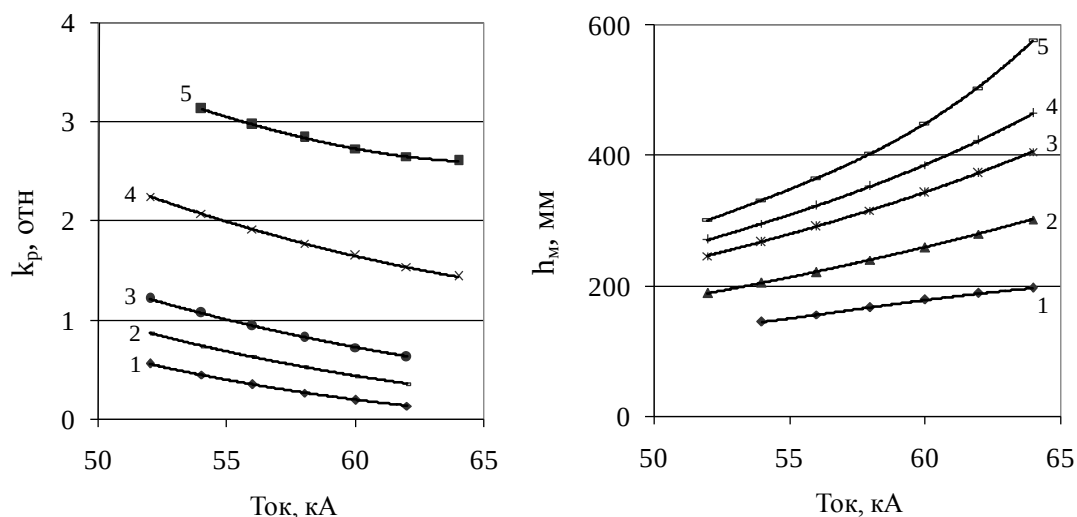


Рис. 7. Зависимости коэффициента k_p , характеризующего растекание тока, и глубины мениска h_M от тока и напряжения питания печного трансформатора, полученные по результату адаптации модели (13): 1 – 991 В; 2 – 1100 В; 3 – 1235 В; 4 – 1290 В; 5 – 1343 В

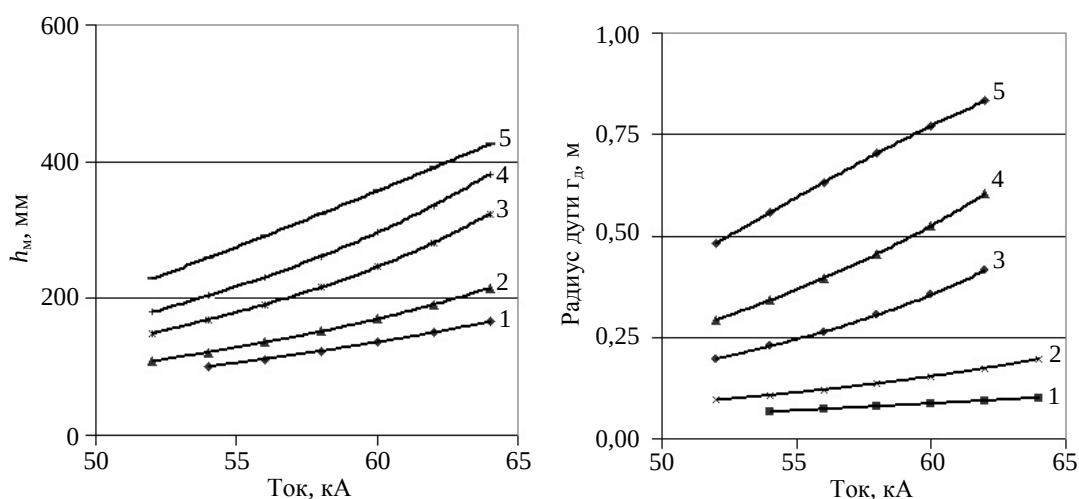


Рис. 8. Зависимости радиуса дуги r_d и глубины мениска h_M от тока и напряжения питания печного трансформатора, полученные по результату адаптации модели (6): 1 – 991 В; 2 – 1100 В; 3 – 1235 В; 4 – 1290 В; 5 – 1343 В

Авторами [12] сделан вывод, что на печах от 8 до 80 МВА при работе на восходящей зависимости мощности дуги от тока (рост мощности с ростом тока) не наблюдается мениска под дугой. При некотором критическом значении тока происходит резкое изменение сечения дуги вследствие перехода из режима работы с катодным пятном в режим работы без пятна, что существенно сказывается на образовании мениска.

Из полученных в ходе адаптации данных можно предположить, что в диапазоне тока 55–70 кА глубина мениска интенсивно нарастает. Данный диапазон токов соответствует области, где экстремальные характеристики зависимости суммарной активной мощности от тока достигают максимума или приближаются к нему (рис. 9). Результаты адаптации модели (13) также свидетельствуют о наличии мениска, что позволяет предположить различия в уровнях токов для разных печей, при которых происходит существенный рост глубины мениска.

Модели (6) и (13), в отличие от упрощенной модели (17), не противоречат данным работ [14, 15] о линейном влиянии тока на глубину образующегося мениска.

Необходимо отметить, что адаптация моделей при значении $\mu = \mu_0$, теоретически характерном для периода жидкой ванны [12], не позволила получить достоверные значения параметров настройки r_d и k_p . Значение μ принималось большим, близким к уровню магнитной проницаемости стали.

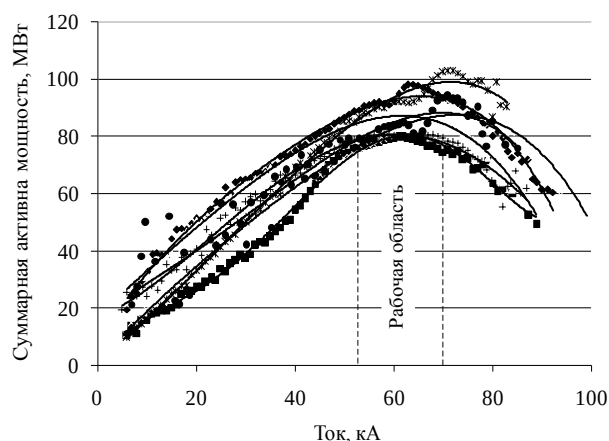


Рис. 9. Экспериментальные зависимости суммарной активной мощности дуг от тока для используемых комбинаций ступеней напряжения питания печного трансформатора и реактора ДСП-180 ОАО «ММК»

Заключение

Полученные результаты приближенно описывают геометрию образующегося под действием электродинамических сил мениска, что позволяет использовать их для решения прикладных задач [2, 3, 16–18], связанных с изучением схем распределения теплового потока дуг на шихтовые материалы с целью повышения производительности или экономичности дуговых сталеплавильных печей переменного тока.

Изучение используемых в условиях ОАО «ММК» режимов показывает, что на заключительных этапах процесса в ДСП уровни токов обычно превышают значения, соответствующие максимумам активной мощности, что частично объясняется желанием увеличить КПД дуг на этапе жидкой ванны. Однако переход к подобным режимам происходит к моменту окончания расплавления материалов резко и скачкообразно. Более рациональным является управление перераспределением теплового потока по ярусам расплавляемых шихтовых материалов на основе схем, полученных расчетным путем [7, 13] или по статистическим данным [3].

Определение закрытой части дуги, излучающей преимущественно на металл, и открытой, излучающей как на металл, так и в рабочее пространство печи на водоохлаждаемые панели стен и свода, позволяет рассчитать рациональные режимы работы ДСП, обеспечивающие максимально интенсивное расплавление шихтовых материалов и нагрев стали до температуры выпуска.

Список литературы

1. Jones, J.A.T. Smart-Gas – A New Approach of Optimizing EAF Operation / J.A.T. Jones, S. Matson, P. Safe // AISTech Proceedings. 2006. №1. P. 473–481.
2. Рябчиков М.Ю., Парсункин Б.Н., Рябчикова Е.С. Выбор режимов работы агрегата ковш-печь с использованием обобщенных оценок качества и затрат на процесс // Черные металлы. 2014. № 12 (996). С. 28–34.
3. Billings, S. Modelling a three-phase electric arc furnace: a comparative study of control strategies / S. Billings // Applied Mathematical Modeling. APPL MATH MODEL. 1997. Vol. 1, no. 7. P. 355–361.
4. Афанасьев В.В., Вишневский Ю.И. Воздушные выключатели. Л.: Энергоатомиздат, 1981. 384 с.
5. Макаров А.Н., Соколов А.Ю. Электрические, геометрические, тепловые параметры дуг, горящих в парах металлов // Электротехнология. 2009. № 11. С. 19–24.
6. Макаров А.Н., Соколов А.Ю., Луговой Ю.А. Обсуждаем проблему: ответы авторов А.Н. Макарова, А.Ю. Соколова, Ю.А. Лугового на отзывы Н.В. Евсеевой на статью «Повышение КПД дуг путем устранения их электромагнитного выдувания в электросталеплавильных печах. Ч. 1 и 2» // Электротехнология. 2012. № 4. С. 27–31.

7. Соколов А.Ю. Разработка дуговой сталеплавильной печи с питанием от трех однофазных трансформаторов: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.10. Тверь, 2010. 138 с.
8. Электрические промышленные печи: Дуговые печи и установки специального нагрева: учебник для вузов / А.Д. Свенчанский, И.Т. Жердев, А.М. Кручинин и др.; под ред. А.Д. Свенчанского. М.: Энергоиздат, 1981. 296 с.
9. Синкевич О.А., Стаханов И.П. Физика плазмы. М.: Высш. шк., 1991. 191 с.
10. Энциклопедия низкотемпературной плазмы: Вводный том: в 4 т. Т. 3. Взаимодействие низкотемпературной плазмы с конденсированным веществом, газом и электромагнитным полем. Численное моделирование низкотемпературной плазмы. Химия низкотемпературной плазм / под ред. В.Е. Фортова. М.: Наука / Интерпериодика, 2000. 574 с.
11. Егоров А.В., Моржин А.Ф. Дуговые сталеплавильные печи постоянного тока. М.: Черметинформация, 1992. 23 с.
12. Исследование электродинамических сил, действующих на дуги в трехфазной дуговой сталеплавильной печи / Евсеева Н.В., Лазуко Л.А., Черкасова Ю.Б., Хасанов С.У. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. 2011. №34 (251). С. 69–74.
13. Макаров А.Н. Теория и практика теплообмена в электродуговых и факельных печах, топках, камерах сгорания. Ч. 1. Основы теории теплообмена излучением в печах и топках. Тверь: ТГТУ, 2007. 184 с.
14. Спелицин Р.И. Исследование заглубления электрической дуги в жидкую ванну в условиях высокоомощных дуговых сталеплавильных печей // Электротехническая промышленность. Сер. Электротермия. 1975. №12. С. 10–11.
15. Пирожников В.Е. Автоматизация электросталеплавильного производства. М.: Металлургия, 1985. 184 с.
16. Рябчикова Е.С., Рябчиков М.Ю., Парсункин Б.Н. Математическое обеспечение имитационной модели процесса управления технологическим режимом агрегата печь-ковш // Автоматизированные технологии и производства. 2013. № 5. С. 54–66.
17. Рябчикова Е.С., Рябчиков М.Ю., Парсункин Б.Н. Моделирование низкочастотных возмущений электрических параметров в дуговой сталеплавильной печи переменного тока ДСП-180 // Электрометаллургия. 2015. № 5. С. 31–40.
18. Zheng, Tongxin. An adaptive arc furnace model / Tongxin Zheng, Elham B. Makram // IEEE Transactions on Power Delivery – IEEE TRANS POWER DELIVERY. 2000. Vol. 15, no. 3. P. 931–939.

Материал поступил в редакцию 14.05.15.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-4-85-95

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE IMPACT PRODUCED BY AC ARC ELECTRODYNAMIC FORCE ON STEEL IN EAF-180 OF MMK OJSC

Elena S. Ryabchikova – Assistant Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. Phone: +7(3519)29-85-58. E-mail: mika.Elena@mail.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6441-1157>

Mihail Yu. Ryabchikov – Ph.D. (Eng.), Associate Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. Phone: +7(3519)29-85-58. E-mail: mr_mgn@mail.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5337-0951>

Boris N. Parsunkin – D.Sc. (Eng.), Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. Phone: +7(3519)29-85-58. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1822-2632>

Abstract

Problem Statement (Relevance): This article describes a method for determining the depth of a meniscus that may occur in liquid steel caused by the electrodynamic forces present in an AC electric arc furnace (EAF). Such information can be helpful when assessing the degree of arc shielding or optimizing the furnace operation. Until recently, it used to take costly experiments to identify the parameters which characterize the effect produced by the arc on steel as there were no means to monitor them. **Objectives:** This paper aims to develop an approach to identify such parameters based on a large amount of process data accumulated under normal operating conditions. **Methods Applied:** The method is based on the correlation between the electrode movement and the changing electrical parameters of the furnace. A number of different arc models have been considered and a number of

assumptions made as to the shape of meniscus, which can help estimate the effect of electrodynamic forces. The process data that was used for model calibration included 300 heats. **Originality:** This paper demonstrates the actual possibility of using simple models simulating the interaction between the AC arc and the liquid steel to identify the meniscus depth based on actual process data. The article also provides all the necessary mathware and algorithms. **Findings:** Based on the assumptions made, a mathematical expression was established that represented the relationship between the average depth of the meniscus and the effect produced by the arc on steel. Relationships were established for the meniscus depth as a function of the electrical parameters in the instance of EAF-180 functioning at the site of Magnitogorsk Iron and Steel Works OJSC. **Practical Relevance:** Using the information about the meniscus depth, one can estimate

what degree of arc shielding is required for different operating modes while tackling the power optimization tasks. Another important application is the opportunity to study disturbances as correlated with the level of steel in the furnace, which can serve as an indirect indication of the turbulence patterns.

Keywords: Electric arc model, submersion, axial electrodynamic forces, meniscus depth, arc column.

References

1. Jones, J.A.T. Smart-Gas – A New Approach of Optimizing EAF Operation. J.A.T. Jones, S. Matson, P. Safe. AISTech Proceedings. 2006, no. 1, pp. 473–481.
2. Ryabchikov M.Yu., Parsunkin B.N., Ryabchikova E.S. Choosing operating modes of a ladle-furnace based on general quality assessment and process costs. *Chernyye metally* [Ferrous metals]. 2014, no. 12 (996), pp. 28–34. (In Russ.)
3. Billings, S. Modelling a three-phase electric arc furnace: a comparative study of control strategies. *Applied Mathematical Modelling*. APPL MATH MODEL. 1997, vol. 1, no. 7, pp. 355–361.
4. Afanasiev V.V., Vishnevskiy Yu.I. *Vozdushnyye vyiklyuchateli* [Air circuit breakers]. Leningrad: Energoatomizdat, 1981. 384 p. (In Russ.)
5. Makarov A.N., Sokolov A.Yu. Electrical, geometrical and thermal parameters of arcs burning in metal vapour. *Elektrometallurgiya* [Electrometallurgy]. 2009, no. 11, pp. 19–24. (In Russ.)
6. Makarov A.N., Sokolov A.Yu., Lugovoy Yu.A. Discussing the problem: The reaction of the authors A.N. Makarov, A.Yu. Sokolov, Yu.A. Lugovoy on the review prepared by N.V. Evseeva on the following article: Improving the performance of arcs by removing the electromagnetic impact in electric arc furnaces. *Elektrometallurgiya* [Electrometallurgy]. 2012, no. 4, pp. 27–31. (In Russ.)
7. Sokolov A.Yu. *Razrabotka dugovoy staleplavilnoy pechi s pitaniem ot trekh odnofaznykh transformatorov* [Designing an electric arc furnace energized by three single-phase transformers]. Ph.D. dissertation. Tver, 2010. 138 p. (In Russ.)
8. Sventchanskiy A.D., Zherdev I.T., Kruchinin A.M. et al. *Elektricheskie promyshlennyye pechi: Dugovyye pechi i ustanovki spetsialnogo nagreva* [Industrial electric furnaces: Electric arc furnaces and special heating units]. Ed. by A.D. Sventchanskiy. Moscow: Energoizdat, 1981. 296 p. (In Russ.)
9. Sinkevich O.A., Stakhanov I.P. *Fizika plazmy* [The physics of plasma]. Moscow: Vysshaya Shkola, 1991. 191 p. (In Russ.)
10. Fortov V.E. The interaction of low-temperature plasma with condensed material, gas and electromagnetic field. Numeric modelling of low-temperature plasma. The chemistry of low-temperature plasma. *Entsiklopediya nizkoterperaturnoy plazmy: Vvodny tom: v 4 tomakh. T. 3*. [Encyclopedia of low temperature plasma: Introduction: 4 Volumes. Vol. 3]. Moscow: Nauka/Interperiodika, 2000. 574 p. (In Russ.)
11. Egorov A.V., Morzhin A.F. *Dugovyye staleplavilnyye pechi postoyannogo toka* [DC arc furnaces]. Moscow: Chernetinformatsiya, 1992. 23 p. (In Russ.)
12. Evseeva N.V., Lazuko L.A., Cherkasova Yu.B., Khasanov S.U. A study of electrodynamic forces acting on the arcs in a three-phase electric arc furnace. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the South Ural State University]. 2011, no. 34 (251), pp. 69–74. (In Russ.)
13. Makarov A.N. *Teoriya i praktika teploobmena v elektrodugovykh i fakelnykh pechakh, topkakh, kamerakh sgoraniya* [The theory and practice of heat exchange in electric arc and torch furnaces, fire chambers, and combustion chambers]. Tver: TGTU, 2007. 184 p. (In Russ.)
14. Spelitsin R.I. A study of the arc submersion in the metal bath of a superpower electric arc furnace. *Elektrotehnicheskaya promyshlennost. Ser. Elektrotermiya* [Electrical industry. The electrothermics series]. 1975, no. 12, pp. 10–11. (In Russ.)
15. Pirozhnikov V.E. *Avtomatizatsiya elektrostaleplavilnogo proizvodstva* [Automation of electric arc furnace process]. Moscow: Metallurgiya, 1985. 184 p. (In Russ.)
16. Ryabchikova E.S., Ryabchikov M.Yu., Parsunkin B.N. Mathware for the ladle furnace process control model. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva* [Automation of technologies and production]. 2013, no. 5, pp. 54–66. (In Russ.)
17. Ryabchikova E.S., Ryabchikov M.Yu., Parsunkin B.N. Simulation of low-frequency perturbations in the AC arc furnace type 180. *Elektrometallurgiya* [Electrometallurgy]. 2015, no. 5, pp. 31–40. (In Russ.)
18. Zheng, Tongxin. An adaptive arc furnace model. Tongxin Zheng, Elham B. Makram. *IEEE Transactions on Power Delivery – IEEE TRANS POWER DELIVERY*. 2000, vol. 15, no. 3, pp. 931–939. (In Russ.)

Received 14/05/15

Рябчикова Е.С., Рябчиков М.Ю., Парсункин Б.Н. Экспериментальное определение параметров воздействия электродинамических сил дуги переменного тока на сталь в ДСП-180 ОАО «ММК» // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т.14. №4. С. 85–95. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-4-85-95

Ryabchikova E.S., Ryabchikov M.Yu., Parsunkin B.N. Experimental analysis of the impact produced by ac arc electrodynamic force on steel in EAF-180 of MMK OJSC. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 4, pp. 85–95. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-4-85-95

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Николаев А.А.¹, Корнилов Г.П.¹, Храмшин Т.Р.¹, Никифоров Г.², Муталлапова Ф.Ф.¹

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

² ЗАО «Магнитогорскгазстрой», Магнитогорск, Россия; Земмеринг, Австрия

Аннотация

Постановка задачи (актуальность работы): современные мощные электроприводы прокатных станов выполняются на базе синхронных и асинхронных двигателей и преобразователей частоты (ПЧ), построенных по симметричной схеме с активными выпрямителями (АВ) и инверторами напряжения. Характерной особенностью АВ является генерирование высокочастотных гармоник напряжения и тока с номерами выше 40-й, что обусловлено применением широтно-импульсной модуляции (ШИМ) для управления силовыми ключами. В системах внутризаводского электрообеспечения металлургических заводов со средним объемом производства (1–2 млн тонн стали в год) используется протяженные распределительные сети среднего напряжения 6–35 кВ. При большой длине кабельных линий суммарное значение распределенной емкости кабелей может достигать нескольких микрофарад. В результате взаимодействия индуктивности сетевого трансформатора и емкостей кабелей в частотной характеристике сети возникает резонанс токов, амплитуда которого при большой величине емкости кабелей может располагаться в области частот высших гармоник, генерируемых АВ. В этом случае возникают сильные высокочастотные искажения напряжения на общих секциях распределительных устройств, что может приводить к выходам из строя преобразователей частоты из-за появления ошибок в работе блоков формирования управляющих импульсов силовых ключей АВ. По этой причине актуальной задачей является исследование различных способов обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) мощных ПЧ с АВ в условиях наличия резонансов токов в частотной характеристике питающей сети. **Цель работы:** в работе исследуются причины возникновения сильных искажений напряжения в сети 10 кВ внутризаводского электрообеспечения металлургического предприятия, где установлены мощные электроприводы клетей прокатного стана, построенные на базе многоуровневых преобразователей частоты с активными выпрямителями. На основании экспериментальных исследований и результатов математического моделирования предложены способы обеспечения электромагнитной совместимости ПЧ с питающей сетью. **Используемые методы:** обработка экспериментальных данных осуществлялась в математическом пакете Matlab с приложением Simulink, где с помощью методов спектрального анализа и разработанных алгоритмов обработки сигналов осуществлялся расчет основных коэффициентов гармонических составляющих напряжения сети 10 кВ. Для исследования способов коррекции частотной характеристики сети 10 кВ использовалось математическое моделирование системы внутризаводского электрообеспечения. **Новизна.** В настоящее время проблема обеспечения ЭМС мощных ПЧ с АВ является малоизученной и слабо освещена в отечественной и зарубежной литературе. В связи с этим результаты исследования, представленные в работе, обладают новизной, теоретической и практической значимостью. **Результат:** основным результатом исследований является рекомендация по использованию специализированного корректирующего фильтра для обеспечения сдвига резонанса токов в безопасную область частотной характеристики 10 кВ, где отсутствуют значимые гармоники силовых преобразователей. **Практическая значимость:** результаты исследований могут быть использованы при проектировании систем электрообеспечения промышленных предприятий для осуществления правильного выбора конфигурации электрических сетей среднего напряжения, а также при решении проблем качества электроэнергии на действующих предприятиях, где при работе мощных ПЧ с АВ возникают сильные высокочастотные искажения напряжения.

Ключевые слова: преобразователь частоты, активный выпрямитель, высшие гармоники, качество электроэнергии, электромагнитная совместимость, резонанс токов, фильтр высших гармоник.

Введение

Современные регулируемые электроприводы выполняют, как правило, на переменном токе с

преобразователями частоты на полностью управляемых ключах – IGBT-транзисторах или запираемых тиристорах.

Применение широтно-импульсной модуляции и интеллектуальных систем управления обеспечивает регулирование напряжения по величине, фазе и частоте в широких пределах. Бла-

© Николаев А.А., Корнилов Г.П., Храмшин Т.Р., Никифоров Г., Муталлапова Ф.Ф., 2016

годаря этому такой электроприемник, как элемент системы электроснабжения, работает в четырех квадрантах комплексной плоскости с коэффициентом мощности, близким к единице.

В нормативных документах и ГОСТ на качество электроэнергии воздействие мощных преобразователей на сеть обычно оценивают по изменениям величины и формы (синусоидальности) питающего напряжения, используя следующие показатели:

- отклонение и колебание напряжения (фликер);
- общее содержание высших гармоник напряжения, характеризуемое суммарным коэффициентом гармонических составляющих напряжения (Total Harmonic Distortion):

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_n^2}}{U_1} \cdot 100\% \quad (1)$$

- значения отдельных коэффициентов гармонических составляющих напряжения:

$$K_{U(n)} = \frac{U_n}{U_1} \cdot 100\% \text{ при } n \leq 40, \quad (2)$$

где n – номер гармоники; U_1 – действующее значение напряжения основной гармоники.

С точки зрения электромагнитной совместимости преобразователь частоты с ШИМ имеет несколько принципиальных отличий от тиристорных преобразователей (ТП) постоянного тока, широко применявшихся ранее [1–3].

Ввиду отсутствия изменений реактивной мощности в переходных режимах величина питающего напряжения в точке подключения преобразователя частоты практически не зависит от его режима работы, т.е. отклонения и колебания напряжения обычно не учитывают.

Преобразователь с ШИМ, как источник напряжения, в отличие от ТП постоянного тока создает искажения питающего напряжения независимо от режима работы, это значит, на холостом ходу и под нагрузкой суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U остается практически одинаковым. При этом в составе токов и напряжений со стороны питающей сети наряду с низкочастотными гармониками (5, 7, 11, 13) присутствуют гармоники средних частот (53–55, 71, 73).

С учетом значительной протяженности кабельных линий, обладающих распределенной емкостью, последнее обстоятельство нередко приводит к возникновению резонансных яв-

ний в указанном диапазоне средних частот даже при отсутствии конденсаторных батарей. Резонанс токов создает значительные искажения напряжения и, как следствие, нарушается работоспособность электроприемников с недостаточной помехоустойчивостью, что приводит в итоге к аварийным отключениям и простоям оборудования [4–6, 16].

1. Результаты экспериментальных исследований гармонического состава напряжения в сети 10 кВ металлургического предприятия с мощными электроприводами клеток сортового стана, выполненных на базе преобразователей частоты с активными выпрямителями

Ниже приводятся результаты экспериментальных исследований ЭМС преобразователей различных классов, работающих в составе непрерывного металлургического агрегата – прокатно-проволочного стана. Такие станы, в комплексе с мощными ДСП, введены в эксплуатацию в различных режимах РФ за последнее время.

Стан включает от 10 до 18 клеток с приводными двигателями мощностью 500–1500 кВт. Каждый из них управляется индивидуальным инвертором, а со стороны постоянного тока несколько инверторов подключают к групповому выпрямителю. Обычно групповой выпрямитель выполняют на диодах, и такое исполнение является вполне оправданным с точки зрения помехоустойчивости и функциональной надежности. Наряду с этим встречаются модифицированные, более усовершенствованные конструкции, в которых параллельно диодам включены IGBT-транзисторы для рекуперации энергии в тормозных режимах, как это сделано, например, по технологии SMART в преобразователях фирмы Siemens [7]. В двигательном режиме работы электропривода ток протекает только по диодам, транзисторы закрыты, поскольку напряжение в звене постоянного тока меньше мгновенных значений напряжения сети. В тормозных режимах напряжение звена постоянного тока вырастает и оказывается больше напряжения сети, как следствие, диоды мостовой схемы закрываются, а ток протекает через транзисторы. На холостом ходу ток протекает попеременно – часть периода времени через диоды, часть – через транзисторы, в зависимости от соотношения двух указанных напряжений. Такое исполнение, как показывает практика, является менее помехоустойчивым.

Ниже на конкретном примере построения схемы электроснабжения одного из проволочных станков показано взаимодействие групповых диодно-

транзисторных выпрямителей и мощного преобразователя, выполненного по схеме «трансформатор – двухзвенный преобразователь частоты с трехуровневым инвертором напряжения – асинхронный двигатель», т.е. по классической схеме активного выпрямителя (рис. 1) [8, 9, 12]. Стан включает 18 клеток с приводными двигателями мощностью 630–1300 кВт и скоростной прокатный блок с асинхронным двигателем мощностью 6300 кВт, управляемый активным выпрямителем. На общие шины 10 кВ подключены восемь трансформаторов мощностью $S = 3,5$ МВА, питающие групповые диодно-транзисторные выпрямители и трансформатор $S = 7,2$ МВА активного выпрямителя фирмы Toshiba Mitsubishi – Electric Industrial Corporation (TMEIC).

Преобразовательные трансформаторы диодных выпрямителей разбиты на две группы и выполнены с различными схемами (группами) соединения обмоток: у одной половины – «треугольник-звезда» $\Delta/Y-11$, у другой – «треугольник-треугольник» $\Delta/\Delta - 0$. Благодаря этому частично скомпенсированы гармоники, характерные для 6-пульсных схем выпрямления – 5, 7...17, 19 (рис. 2). Содержание высших гармоник в линейном напряжении на шинах 10 кВ находится на уровне 2%.

Ситуация существенно меняется при включении активного выпрямителя – преобразователя TMEIC. Общее содержание высших гармоник

$K_{U\Sigma} = (\sqrt{U^2 - U_1^2}) \cdot 100\% / U_1$ на шинах 10 кВ приближается к 10%, а это весьма отрицательно отражается на устойчивости систем управления диодно-транзисторных выпрямителей и другого оборудования, подключенного к общим шинам 10 кВ. Здесь следует отметить, что действующие в России стандарты на качество электроэнергии (ГОСТ 54149-2010, ГОСТ 32144-2013), а также международные стандарты (EN 50160 и EN 61000-2-2) при расчете суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения учитывают гармоники до 40-го порядка в соответствии с формулой (1).

По характеру изменения линейного напряжения и его гармоническому составу (рис. 3) следует предположить, что в диапазоне частот, кратном 53–65 гармоникам, имеет место резонанс токов [10, 11]. Он создается в контуре, образованном индуктивным сопротивлением рассеяния сетевого трансформатора 110/10 кВ и совокупной емкостью кабельных линий на 10 кВ.

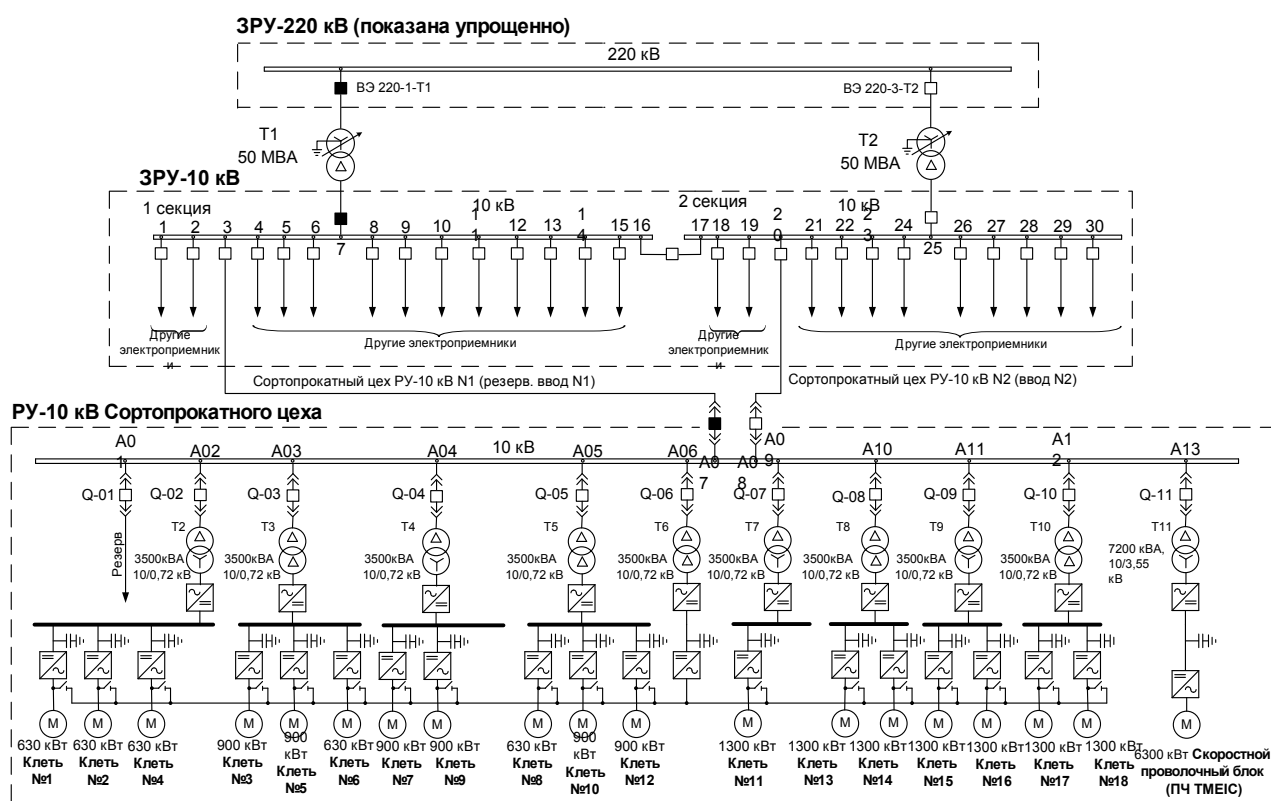


Рис. 1. Схема электроснабжения главных приводов сортового стана

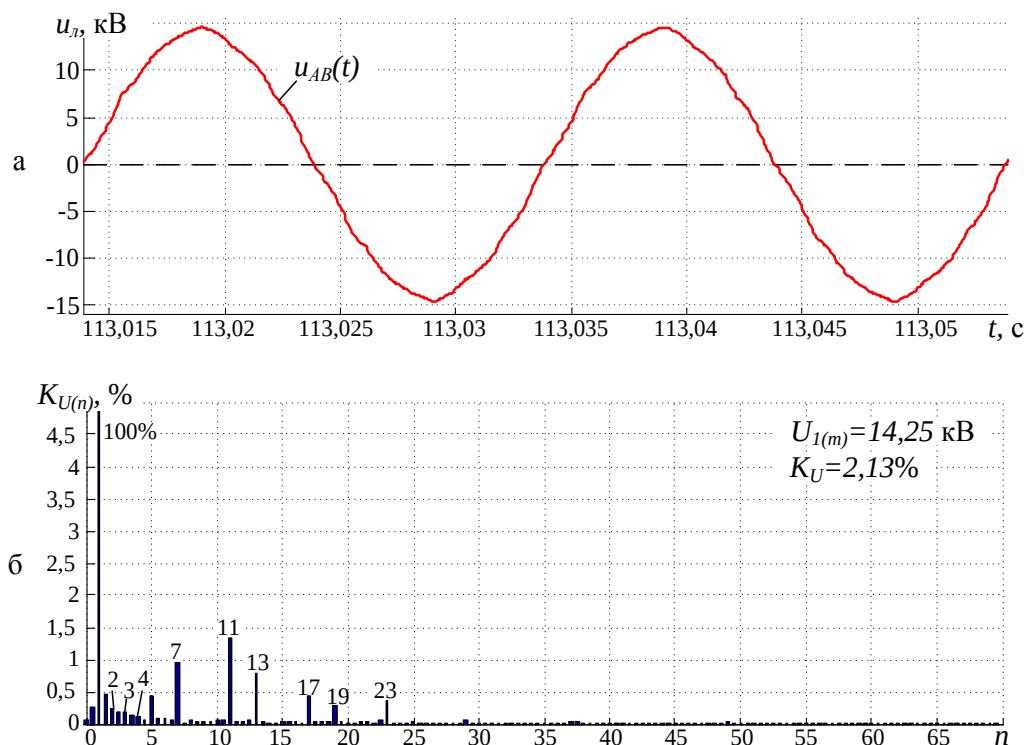


Рис. 2. Мгновенные значения линейного напряжения на шинах 10 кВ (а) и его гармонический состав (б) при работе групповых диодных выпрямителей

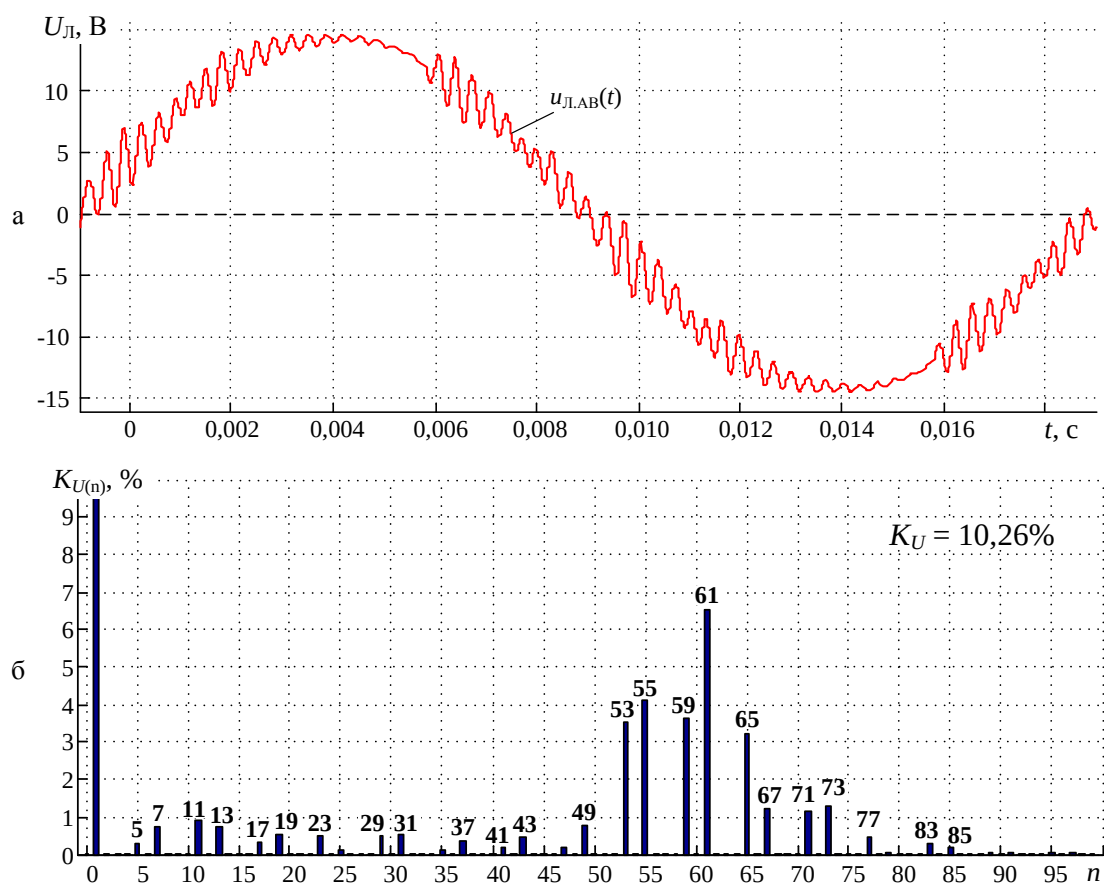


Рис. 3. Мгновенные значения линейного напряжения на шинах 10 кВ (а) и его гармонический состав (б) при работе ТМБСЗ

2. Экспериментальное исследование частотной характеристики сети 10 кВ внутризаводского электроснабжения

Для подтверждения выдвинутой гипотезы выполнен пассивный эксперимент с целью получения частотной характеристики сети – зависимости полного сопротивления (импеданса) от частоты $Z(f)$ (рис. 4). В качестве генератора сигналов успешно использован активный выпрямитель преобразователя ТМЕИС, частотный диапазон которого намного превышает область резонанса, а для записи мгновенных значений токов и напряжений установлены быстродействующие регистраторы сигналов Elspec G 4720 и Flash-Recorder с достаточным объемом памяти.

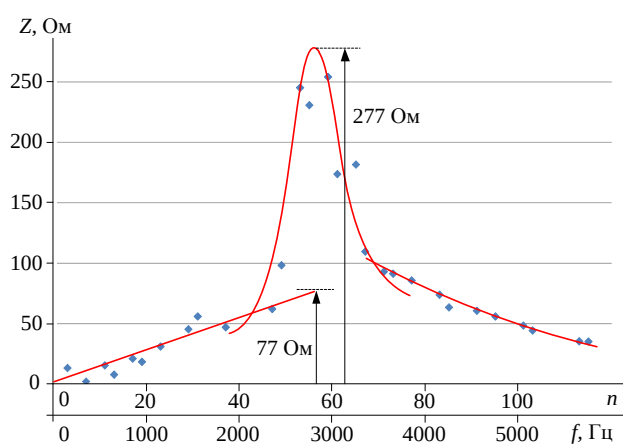


Рис. 4. Частотная характеристика сети – зависимость полного сопротивления (импеданса) от частоты (номера гармоники), точками показаны экспериментальные данные, сплошными линиями – их аппроксимация

Несложные расчеты позволяют ориентировочно оценить резонансную частоту ν , зная параметры сетевого трансформатора, а также общую длину и емкость $C_{\text{КЛ}}$ кабельных линий на стороне 10 кВ:

$$\nu \cdot X_T = \frac{X_{\text{КЛ}}}{\nu}; \quad (3)$$

$$\nu = \sqrt{\frac{X_{\text{КЛ}}}{X_T}}; \quad (4)$$

$$X_T = u_k \cdot \frac{U^2}{S_{\text{НТ}}}; \quad (5)$$

$$X_{\text{КЛ}} = \frac{1}{\omega \cdot C_{\text{КЛ}}}, \quad (6)$$

где X_T , $X_{\text{КЛ}}$ – индуктивное сопротивление транс-

форматора и емкостное сопротивление кабельных линий; U , ω – напряжение и частота питающей сети; u_k , $S_{\text{НТ}}$ – напряжение короткого замыкания и мощность сетевого трансформатора 110/10 кВ;

$$\nu = \sqrt{\frac{S_{\text{НТ}}}{u_k \cdot U^2 \cdot \omega \cdot C_{\text{КЛ}}}} = \sqrt{\frac{S_{\text{НТ}}}{u_k \cdot Q_{\text{КЛ}}}}, \quad (7)$$

где $Q_{\text{КЛ}} = U^2 \cdot \omega \cdot C_{\text{КЛ}}$ – реактивная мощность кабельных линий.

Метод частотных характеристик становится более универсальным и эффективным при использовании математических моделей систем электроснабжения. В этом случае он позволяет анализировать различные варианты схем и выявлять возможные резонансы как на стадии проектирования, так и эксплуатации действующего оборудования [12, 14].

3. Исследование возможных способов коррекции частотной характеристики сети 10 кВ для исключения сильных искажений синусоидальности кривой напряжения при работе мощных ПЧ с АВ

Проблема обеспечения ЭМС в широком плане для проектируемых и реконструируемых объектов заслуживает отдельного рассмотрения. В данной работе для уменьшения воздействия активного выпрямителя в существующей схеме электроснабжения принято наиболее простое и реализуемое решение – коррекция частотной характеристики, т.е. смещение резонансного максимума в ту область, где отсутствуют гармоники, генерируемые ТП и активным выпрямителем. [13, 14–16]. На рис. 5 приведена частотная характеристика существующей схемы электроснабжения проволочного стана, полученная с помощью пакета Matlab с приложением Simulink. При создании модели приняты следующие допущения:

- активный выпрямитель ТМЕИС представлен источником напряжения, у которого гармонический состав тока близок к реальному;
- групповые диодные выпрямители реализованы в виде источников тока, параметры которых определены в результате эксперимента;
- кабельные линии на модели представлены с помощью П-образных схем замещения с учетом активного сопротивления, индуктивности и емкостей в начале линии и конце в виде так называемых «П-секций», параметры которых рассчитывают на основе известных удельных величин r_0 , l_0 , C_0 в соответствии с маркой кабеля и его длиной;
- остальные электроприемники представлены эквивалентными линейными моделями в виде активно-индуктивных сопротивлений с фик-

сированными параметрами.

Для рассматриваемой схемы электроснабжения емкость кабельных линий находится в пределах $C_{\text{КЛ}} = 2,8\text{--}3$ мкФ, что соответствует изменению резонансной частоты в диапазоне $\nu = 57\text{--}61$.

На частотной характеристике (см. **рис. 5**) заштрихованы области, в которых появление резонансов недопустимо – это низкочастотная область $f = 250\text{--}650$ Гц ($n = 5\text{--}13$) и диапазон средних частот $f = 2450\text{--}3850$ Гц ($n = 49\text{--}77$).

Для коррекции частотной характеристики, т.е. исключения резонанса токов в указанных диапазонах, обоснованы рекомендации включения на шины 10 кВ дополнительной емкости в составе УКРМ-750 (устройство компенсации реактивной мощности 750 кВАр). При этом важным моментом является значение индуктивности реактора УКРМ. Эффект значительного сдвига резонанса тока возможен только при низких значениях L_p , не превышающих нескольких сотен микрогенри.

При использовании УКРМ-750 резонансная частота будет составлять

$$\nu = \sqrt{\frac{S_{\text{HT}}}{u_k(Q_{\text{КБ}} + Q_{\text{КЛ}})}} = \sqrt{\frac{50 \cdot 10^6}{0,155(750 + 94,2) \cdot 10^3}} = 19,5, \quad (8)$$

где $S_{\text{HT}} = 50$ МВА, $u_k = 15,5\%$, $Q_{\text{КБ}} = 750$ кВАр, $Q_{\text{КЛ}} = U^2 \cdot \omega \cdot C_{\text{КЛ}} = 94,2$ кВАр.

Скорректированная частотная характеристика с включенной конденсаторной установкой приведена на **рис. 6**. Кривая мгновенных значений напряжения близка по форме к синусоиду (**рис. 7**). Суммарный коэффициент высших гармонических составляющих в данном случае не превышает 3%.

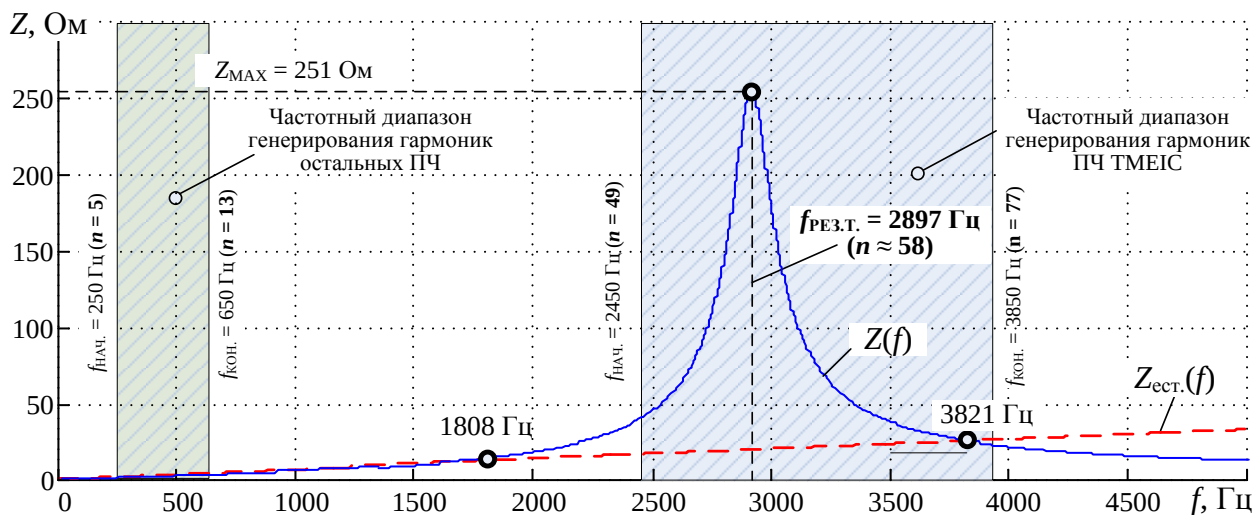


Рис. 5. Исходная частотная характеристика сети 10 кВ при существующей конфигурации

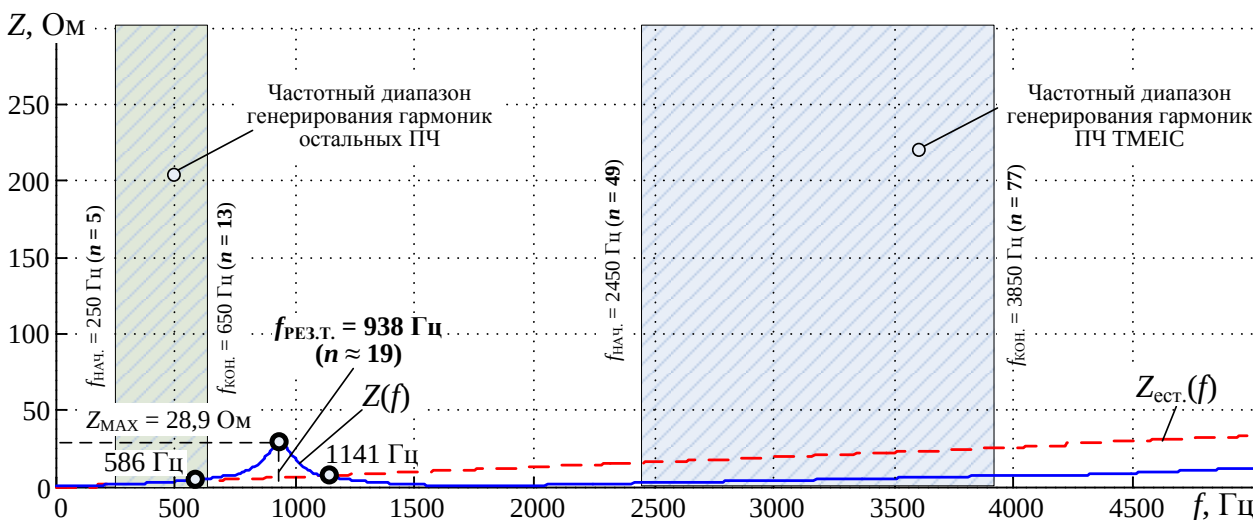


Рис. 6. Частотная характеристика сети 10 кВ после включения УКРМ-750

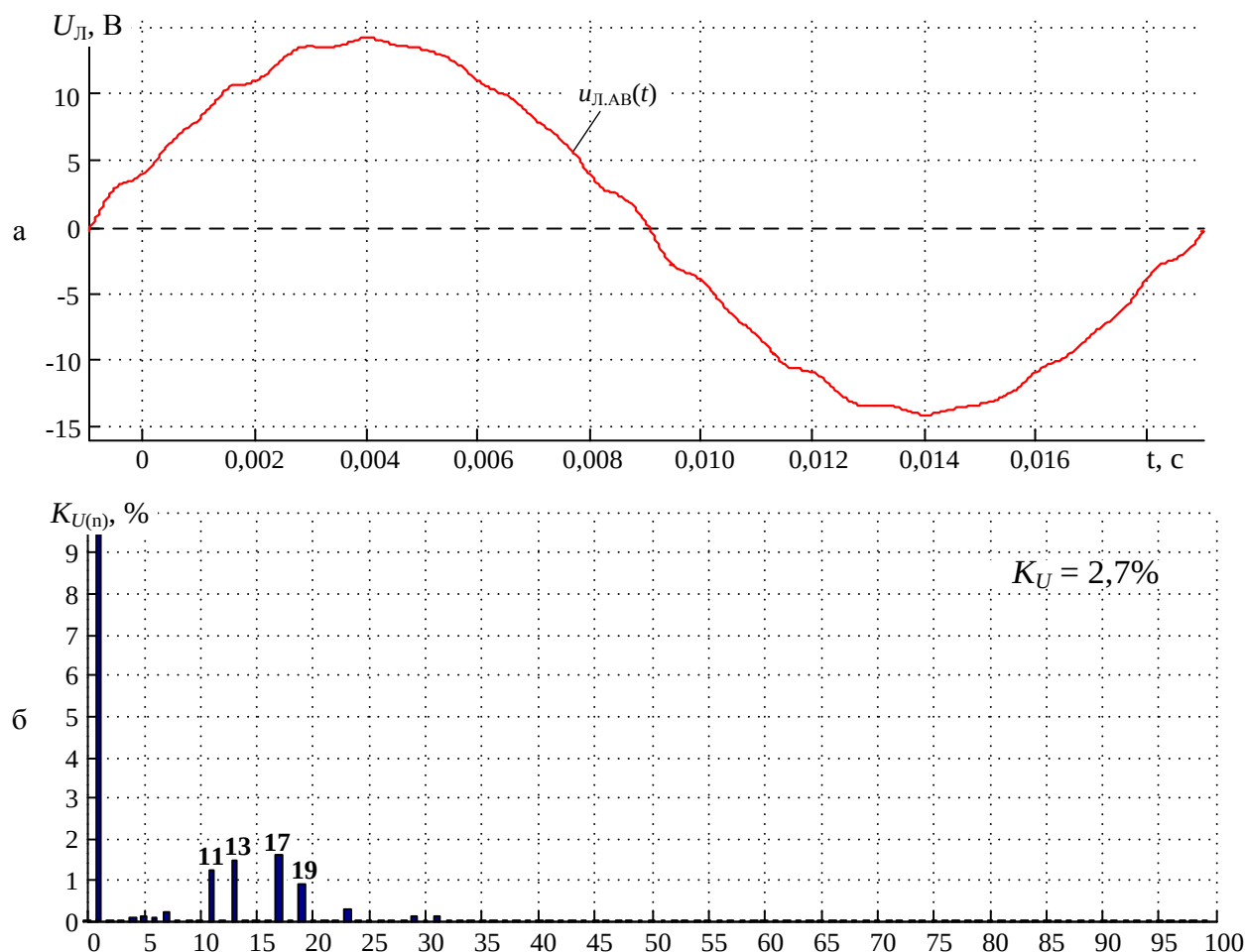


Рис. 7. Мгновенные значения линейного напряжения на шинах 10 кВ (а) и гармонический состав (б) напряжения при включении УКРМ-750

Выводы

1. При выборе схем электроснабжения с мощными электроприводами, имеющими в своем составе преобразователи частоты с активными выпрямителями, следует учитывать частотный диапазон генерируемых гармоник и частотную характеристику сети. При неправильном выборе конфигурации внутривзаводского электроснабжения может возникнуть наложение частотного диапазона гармоник, генерируемых активными выпрямителями, на частотную область характеристики питающей сети, где имеет место резонанс тока, образованный взаимным влиянием индуктивности понизительного трансформатора, установленного на главной понизительной подстанции предприятия, и распределенной емкости протяженных кабельных линий. В результате этого возникают сильные искажения синусоидальности кривой напряжения, что в свою очередь может привести к выходу из строя других силовых преобразователей, получающих питание от общих секций среднего напряжения.

2. Сложность выявления резонансных явлений в условиях действующего производства вызвана периодическим изменением схемы электроснабжения электроприемников за счет проведения оперативных переключений на электрической подстанции. В зависимости от количества подключенных кабельных линий создаются условия для появления резонанса, совпадающего с частотной областью высших гармоник, генерируемых мощными активными выпрямителями преобразователей частоты. Отсутствие четкого понимания условий возникновения сильных искажений напряжения является серьезной проблемой для электротехнического персонала заводской подстанции и цехов предприятия, поскольку аварийные выходы из строя силовых преобразователей электроприводов могут происходить при неудачном сочетании включенных ячеек на главной понизительной подстанции.

3. Экспериментальное исследование искажений синусоидальности кривой напряжения при работе

мощных преобразователей частоты с активными выпрямителями усложняется из-за того, что область значимых гармоник, определяемая используемыми алгоритмами широтно-импульсной модуляции, как правило, располагается за пределом диапазона частот, учитываемыми анализаторами качества электроэнергии, функционирующими в соответствии в ГОСТ 32144-2013. В данном случае при анализе коэффициента суммарного искажения синусоидальности кривой напряжения нужно принимать во внимание высокочастотные гармоники напряжения с $n \geq 40$.

4. Электромагнитная совместимость преобразователей частоты с активными выпрямителями в системе электроснабжения может быть обеспечена при выполнении главного условия, а именно: частотный диапазон гармоник, генерируемых активным выпрямителем, не должен совпадать с резонансным максимумом частотной характеристики сети. Для выполнения этого условия существует несколько способов: 1) выбор частоты и метода широтно-импульсной модуляции активного выпрямителя; 2) коррекция частотой характеристики сети за счет выбора безопасной конфигурации схемы электроснабжения; 3) установка дополнительных компенсирующих устройств и фильтров.

Список литературы

1. Исследование воздействия активных выпрямителей большой мощности на питающую сеть / Т.Р. Храмшин, Г.П. Корнилов, А.А. Николаев и др. // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2013. №1. С. 80–83.
2. F. Endrejat and P. Pillay, "Resonance Overvoltages in Medium Voltage Multilevel Drive System," 2007 IEEE International Electric Machines & Drives Conference, Antalya, 2007, pp. 736–741.
3. K. M. Alawasa, Y. A. R. I. Mohamed and W. Xu, "Active Mitigation of Subsynchronous Interactions Between PWM Voltage-Source Converters and Power Networks," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no. 1, pp. 121–134, Jan. 2014.
4. Храмшин Т.Р., Круглов Д.С., Корнилов Г.П. Оценка методов широтно-импульсной модуляции напряжения активных выпрямителей прокатных станов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. №2. С. 48–52.
5. Храмшин Т.Р., Абдулвелеев И.Р., Корнилов Г.П. Обеспечение электромагнитной совместимости мощных электротехнических комплексов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». 2015. Т. 15, № 1. С. 82–93.
6. J. Dong, L. Rixin, W. Fei, L. Fang, W. Shuo, and D. Boroyevich, "Study of conducted EMI reduction for three-phase active front-end rectifier," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 12, pp. 3823–3831, Dec. 2011.
7. B. Piepenbreier and L. Sack, "Regenerative drive converter with line-frequency switched rectifier and without DC link components," *Power Electronics Specialists Conference*, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual, 2004, pp. 3917–3923, vol. 5.
8. Крюков О.В. Сравнение характеристик высоковольтных преобразователей частоты электроприводов // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2016. Т. 3, № 2. С. 50–56.
9. V. Miskovic, V. Blasko, T. Jahns, A. Smith and C. Romenesco, "Observer based active damping of LCL resonance in grid connected voltage source converters," 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Denver, CO, 2013, pp. 4850–4856.
10. G. Shen, D. Xu, L. Cao, and X. Zhu, "An improved control strategy for grid-connected voltage source inverters with an LCL-filter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 23, no. 4, pp. 1899–1906, Jul. 2008.
11. J. R. Rodriguez, J. Pontt, R. Huerta, G. Alzamora, N. Becker, S. Kouro, P. Cortes, and P. Lezana, "Resonances in a high-power active-front-end rectifier system," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 52, no. 2, pp. 482–488, Apr. 2005.
12. K. O'Brien, R. Teichmann and S. Bernet, "Active rectifier for medium voltage drive systems," *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2001. APEC 2001. Sixteenth Annual IEEE, Anaheim, CA, 2001, pp. 557–562, vol. 1.
13. M. Yuquan, Z. Lihong and H. Shufen, "Calculation of the Filter Parameters for the Aluminum Electrolysis Rectifier," *Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA)*, 2010 International Conference on, Changsha, China, 2010, pp. 906–910.
14. S. Chaladying, A. Charlangsut and N. Rugthaichareoncheep, "Parallel resonance impact on power factor improvement in power system with harmonic distortion," *TENCON 2015 – 2015 IEEE Region 10 Conference*, Macao, 2015, pp. 1–5.
15. T.M. Blooming and D.J. Carnovale, "Application of IEEE STD 519-1992 Harmonic Limits," *Conference Record of 2006 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference*, Appleton, WI, 2006, pp. 1–9.
16. J. Pontt, J. Rodriguez, J. S. Martin, R. Aguilera, R. Bernal and P. Newman, "Resonance mitigation and dynamical behavior of systems with harmonic filters for improving reliability in mining plants," *Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting*, Tampa, FL, 2006, pp. 1298–1302.

Материал поступил в редакцию 19.10.16.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-4-96-105

EXPERIMENTAL STUDY OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF MODERN ELECTRIC DRIVES USED IN THE POWER SUPPLY SYSTEM OF A METALLURGICAL ENTERPRISE

Aleksandr A. Nikolaev – Ph.D. (Eng.), Associate Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: aa.nikolaev@magtu.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5014-4852>

Gennady P. Kornilov – D.Sc. (Eng.), Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: korn_mgn@mail.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2451-3850>

Timur R. Khramshin – Ph.D. (Eng.), Associate Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: timur.hramshin@mail.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0129-3653>

Gennady Nikiforov – D.Sc. (Eng.), Chairman of the Board

Magnitogorskazstroj CJSC, Magnitogorsk, Russia; Semmering, Austria. E-mail: alexxnik@hotmail.com

Faina F. Mutallapova – Master Degree Student

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: Faina_urmanova@mail.ru

Abstract

Problem Statement (Relevance): Modern high-power electric drives used in rolling mills are made on the basis of synchronous and induction motors and frequency converters (FC), which are, in turn, designed according to the symmetrical principal and include active rectifiers (AR) and inverters. A typical feature of ARs is that they generate high frequency voltage and current with harmonic numbers higher than 40, which is due to the application of the pulse width modulation (PWM) necessary to control the power keys. The in-house power supply systems of metallurgical plants with the medium output of 1 to 2 mln tons of steel per year usually rely on 6-35 kV distributed medium voltage power networks. With high cable runs, the total distributed capacitance of the cables may reach several microfarads. The interaction between the network step-down transformer inductance and the power cables capacitance causes a current resonance to occur in the network frequency characteristic. If the cable capacitance is high, the current resonance may occur in the area of high frequency harmonics generated by the AR. This can cause a considerable high-frequency voltage distortion occurring on the shared sections of the switchgear which may lead to frequency converter failures due to faults occurring in the pulse generation blocks of the active rectifier power keys. Thus, finding ways to ensure the electromagnetic compatibility (EMC) of high-power FCs and ARs in the conditions of current resonances present in the frequency characteristic of the power network presents an important problem. **Objectives:** This article focuses on identifying the causes of high voltage distortion that can occur in the 10 kV in-house power network of a metallurgical plant which houses a rolling mill with high-power electric drives designed on the basis of multi-level frequency converters with active rectifiers. Based on the results of an experimental study and mathematical simulation, the authors offered new ways to ensure the electromagnetic compatibility between the FCs and the power network. **Methods Applied:** The experimental data were processed with the help of the Matlab package comprising the Simulink application. Using the spectral analysis methods and some original data processing algorithms the main coefficients of 10 kV network voltage harmonics were calculated. The ways to improve the frequency characteristic of a 10 kV power network were examined by simulating an in-house power supply system. **Originality:** As of today, the problem of ensuring the EMC of

high-power FCs and ARs is little studied and only limitedly covered in either Russian or foreign literature. Thus the research results presented in this paper can be described as original and theoretically and practically relevant. **Findings:** This research provides recommendations on the use of a special correction filter ensuring a current resonance shift towards the safety area of the frequency characteristic of a 10 kV power network which does not have high harmonics generated by power converters. **Practical Relevance:** This research may be applicable when designing power supply systems for industrial application as it can help choose the right configuration of medium voltage power networks. This research can also be of relevance for the existing sites which face power quality issues caused by a significant high-frequency harmonic distortion of voltage resultant from the use of high-power FCs and ARs.

Keywords: Frequency converter, active rectifier, upper harmonics, power quality, electromagnetic compatibility, current resonance, harmonic filter.

References

1. Kramshin T.R., Kornilov G.P., Nikolaev A.A. et al. The study of the impact produced by high-power active rectifiers on the power supply system. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University], 2013, no. 1, pp. 80–83. (In Russ.)
2. F. Endrejat and P. Pillay. Resonance Overvoltages in Medium Voltage Multilevel Drive System. IEEE International Electric Machines & Drives Conference. Antalya. 2007, pp. 736–741.
3. K. M. Alawasa, Y. A. R. I. Mohamed and W. Xu. Active Mitigation of Subsynchronous Interactions Between PWM Voltage-Source Converters and Power Networks. IEEE Transactions on Power Electronics. Jan. 2014, vol. 29, no. 1, pp. 121–134.
4. Khramshin T.R., Krutsov D.S., Kornilov G.P. Evaluating the pulse width modulation methods applicable to the voltage of active rectifiers used in rolling mills. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyi nauchnyi zhurnal* [Russian Internet Journal of Mechanical Engineering], 2013, no. 2, pp. 48–52.
5. Khramshin T.R., Abdulveleev I.R., Kornilov G.P. Ensuring electromagnetic compatibility of high-power electrotrical equipment. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Energetika"* [Vestnik of South Ural State University. Series: Power Engineering], 2015, Vol. 15, no. 1, pp. 82–93. (In Russ.)
6. J. Dong, L. Rixin, W. Fei, L. Fang, W. Shuo, and D. Boroyevich. Study of conducted EMI reduction for three-phase active front-end rectifier. IEEE Trans. Power Electron. Dec. 2011, vol. 26, no. 12, pp. 3823–3831.

7. B. Piepenbreier and L. Sack. Regenerative drive converter with line-frequency switched rectifier and without DC link components. Power Electronics Specialists Conference. 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual. 2004, vol. 5, pp. 3917–3923.
8. Kryukov O.V. A comparison of high voltage frequency converters used in electric drives. *Elektrotehnika: setevoy elektronnyi nauchnyi zhurnal* [Russian Internet Journal of Electrical Engineering], 2016, vol. 3, no. 2, pp. 50–56.
9. V. Miskovic, V. Blasko, T. Jahns, A. Smith and C. Romenesko. Observer based active damping of LCL resonance in grid connected voltage source converters. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Denver. CO. 2013, pp. 4850–4856.
10. G. Shen, D. Xu, L. Cao, and X. Zhu. An improved control strategy for grid-connected voltage source inverters with an LCL-filter. IEEE Trans. Power Electron. Jul. 2008, vol. 23, no. 4, pp. 1899–1906.
11. J. R. Rodriguez, J. Pontt, R. Huerta, G. Alzamora, N. Becker, S. Kouro, P. Cortes, and P. Lezana. Resonances in a high-power active-front-end rectifier system. IEEE Trans. Ind. Electron. Apr. 2005, vol. 52, no. 2, pp. 482–488.
12. K. O'Brien, R. Teichmann and S. Bernet. Active rectifier for medium voltage drive systems. Applied Power Electronics Conference and Exposition 2001. APEC 2001. Sixteenth Annual IEEE. Anaheim. CA. 2001, vol. 1, pp. 557–562.
13. M. Yuquan, Z. Lihong and H. Shufen, "Calculation of the Filter Parameters for the Aluminum Electrolyzation Rectifier. Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA) 2010 International Conference on Changsha. China. 2010, pp. 906–910.
14. S. Chaladying, A. Charlangsut and N. Rugthaichareoncheep. Parallel resonance impact on power factor improvement in power system with harmonic distortion. TENCON 2015 – 2015 IEEE Region 10 Conference. Macao, 2015, pp. 1–5.
15. T. M. Blooming and D. J. Carnovale. Application of IEEE STD 519-1992 Harmonic Limits. Conference Record of 2006 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference. Appleton. WI. 2006, pp. 1–9.
16. J. Pontt, J. Rodriguez, J. S. Martin, R. Aguilera, R. Bernal and P. Newman. Resonance mitigation and dynamical behavior of systems with harmonic filters for improving reliability in mining plants. Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting. Tampa. FL. 2006, pp. 1298–1302.

Received 19/10/16

Экспериментальные исследования электромагнитной совместимости современных электроприводов в системе электроснабжения металлургического предприятия / Николаев А.А., Корнилов Г.П., Храмшин Т.Р., Никифоров Г., Муталлапова Ф.Ф. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т.14. №4. С. 96–105. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-4-96-105

Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Khrumshin T.R., Nikiforov G., Mutallapova F.F. Experimental study of electromagnetic compatibility of modern electric drives used in the power supply system of a metallurgical enterprise. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 4, pp. 96–105. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-4-96-105

СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ, ПОДГОТОВКА И ОБУЧЕНИЕ СПЕЦИАЛИСТОВ

УДК 339.92: 377.44

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-4-106-114

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРИ МОДЕРНИЗАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ И ПРОЦЕССОВ (СТАЛЬ-СОРТОВОЙ ПРОКАТ) НА ОСНОВЕ ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ КАДРОВ В РАМКАХ РОССИЙСКО-КУБИНСКОГО СОТРУДНИЧЕСТВА

Тулупов О.Н.¹, Моллер А.Б.¹, Наливайко А.В.², Райес М.С.³, Гуэрра Х.А.³¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия² ОАО «Институт Цветметобработка», Москва, Россия³ Металлургический завод Хосе Марти (José Martí), Куба

Аннотация

Постановка задачи (актуальность работы): данная статья посвящена международному взаимодействию в металлургической отрасли – приоритетному промышленному кластеру экономического развития. Постоянное стремление к повышению гибкости и экономической эффективности производства делает актуальным поиск новых способов контроля и улучшения качества продукции, компетенций персонала и технологических факторов. **Цель работы:** эффективность работы металлургического предприятия зависит от уровня квалификации персонала. Персонал является главным ресурсом в системе менеджмента качества, поскольку факторы, создающие условия для обеспечения и улучшения качества, в первую очередь не технические, а социальные. Поэтому высшему руководству организаций, ориентированных на устойчивое развитие, необходимо заботиться об уровне интеллектуального потенциала человеческих ресурсов компании. **Используемые методы:** адаптивные программы подготовки кадров для пусковых объектов в России и других странах для металлургической отрасли стали одним из наиболее успешных совместных проектов МГТУ им. Г.И. Носова и ОАО «ММК» под эгидой компании «МЕТАЛЛУРГМАШ Инжиниринг». **Новизна:** в феврале-апреле 2016 года для пятнадцати работников завода Хосе Марти осуществлен пилотный образовательный проект по программе «Эксплуатация и ресурсосбережение для современных металлургических комплексов по производству стали и сортового проката», проходящий в рамках межправительственного соглашения между Россией и Кубой, предусматривающего планы модернизации кубинского металлургического предприятия. **Результат:** основными участниками широкомасштабного проекта стали: Металлургический завод Antillana de Acero (Завод им. Хосе Марти, входящий в промышленную группу GESIME (ранее ACINOX)), МГТУ им. Г.И. Носова, Магнитогорский металлургический комбинат, МЕТАЛЛУРГМАШ Инжиниринг, КонсОМ СКС, корпоративный центр подготовки кадров «Персонал». **Практическая значимость:** предусмотрено два пути дальнейшего укрепления и развития международного научно-образовательного проекта. Продолжение успешно реализованных трёхмесячных курсов повышения квалификации и стажировки на металлургическом предприятии для следующих групп слушателей с общей численностью до 300 человек. Подготовка молодых и перспективных выпускников кубинских вузов по форме магистратуры на базе МГТУ им. Г.И. Носова с выполнением выпускной квалификационной работы по актуальным темам их места работы на заводе Хосе Марти.

Ключевые слова: промышленный кластер, технологическая платформа, инновационное партнёрство, кадровый потенциал, международные программы подготовки специалистов, управление знаниями, инновационные технологии, оценка персонала, уровень компетентности.

Введение

В 2014–2015 гг. компанией МЕТАЛЛУРГМАШ Инжиниринг по заказу Министерства про-

мышленности Кубы был проведен технологический аудит металлургического предприятия Хосе Марти (Куба), к которому были активно привлечены ведущие специалисты – преподаватели и сотрудники МГТУ, а затем был разработан предпроектный документ «Обоснование инвестиций», ко-

© Тулупов О.Н., Моллер А.Б., Наливайко А.В., Райес М.С., Гуэрра Х.А., 2016

торый лег в основу комплексной программы технического, технологического и кадрового перевооружения завода в рамках межправительственного кредитного соглашения Россия-Куба.

Подобные проекты направлены на развитие и укрепление финансовой и социальной стабильности через взаимную справедливую экономическую интеграцию, создание оптимальных условий для эффективного сотрудничества и реализации технологического потенциала в базовых и индустриальных отраслях, особенно в металлургии, так как она является одним из приоритетных промышленных кластеров развития экономики, которые обеспечивают становление и эволюцию различных секторов экономики. Российские ученые и производственники имеют богатый опыт международного сотрудничества в металлургическом секторе Китае, Индии, в Африке и успешно ведут технологическое сотрудничество на современном металлургическом рынке.

Технические и технологические разработки

Основные направления сотрудничества в рамках данной концепции это:

- технические и технологические направления сотрудничества;
- сотрудничество в сфере науки и инноваций;
- организационные формы сотрудничества;
- профессиональная подготовка, переподготовка и повышение квалификации кадров в области металлургии;
- экономическая составляющая сотрудничества.

Инновационная стратегия предприятия должна быть нацелена не только на создание новых продуктов, но и на разработку новых технологий, обеспечивающих выпуск высококачественной продукции. Такая стратегия (рис. 1) требует создания процессов управления знаниями и инновациями, наличие которых сформирует основные элементы интеллектуального и инновационного капитала предприятия [1]. В настоящее время это приобретает особое значение, поскольку инновационные технологии стали одной из важнейших сфер, определяющих перспективы развития современных предприятий на мировом рынке. Наряду с созданием инновационных технологий и продуктов важен поиск новых и расширение существующих рынков сбыта продукции, позволяющих предприятию не только оставаться конкурентоспособным, но и усилить свои позиции на рынке. Создание и развитие инновационных сетей позволит значительно сократить время разработки и вывода на рынок новых продуктов и услуг. Инновационная культура позволяет создавать новые технологии и продукты, а также образует преемственность на этапах разработки. Для формирования новых знаний необходимы новые таланты, выявлением которых согласно СМК должны заниматься руководители, направляющие и поощряющие персонал на всестороннее повышение квалификации, профессиональную переподготовку и развитие компании.



Рис. 1. Инновационная стратегия производства

В постоянно изменяющихся условиях труда предприятия особенно должны быть заинтересованы в высококвалифицированном и компетентном персонале. Таким образом, одним из ключевых моментов эффективного управления персоналом предприятия, направленного на инновационный рост, становится целенаправленная опережающая подготовка кадров [2]. Подход к подготовке кадров должен носить системный характер, базирующийся на анализе уровня компетентности каждого сотрудника. Предварительная оценка профессиональных качеств сотрудников позволяет обеспечить производство соответствующими специалистами, а также оценить их трудовой потенциал. Все это дает возможность выработать индивидуальную карьерную траекторию для каждого работника и распределить сотрудников в соответствии с их способностями.

Наряду со знанием уровня компетенции и квалификации персонала также необходимо производить оценку состояния оборудования. В качестве критериев оценки можно использовать такие показатели, как надежность, производительность, энергоемкость, экологичность, мо-

ральный и физический износ, уровень техники и технологии [3]. Знание этих характеристик обеспечивает выбор необходимых путей совершенствования технологического процесса, оборудования и подготовки кадров. В результате совокупный учет компетентности персонала и состояния оборудования позволяет формировать инновационную политику предприятия.

В рамках проведения технологического аудита было проведено обследование металлургического завода Хосе Марти, имеющего в качестве основных технологических переделов производство стали из металлического лома на ДСП-70, непрерывную разливку сортовой заготовки (примерно поровну – передельной и товарной заготовки) и прокатку сортового проката (преимущественно арматуры) на станах 350 и 250.

Выборочная проверка практической работы участка контроля на стане 250 показала: практическая работа по контролю качества ведется на удовлетворительном уровне.

Оценка качества заготовок и проката была проведена методом систематизации данных и представления в виде графиков (рис 2, 3).

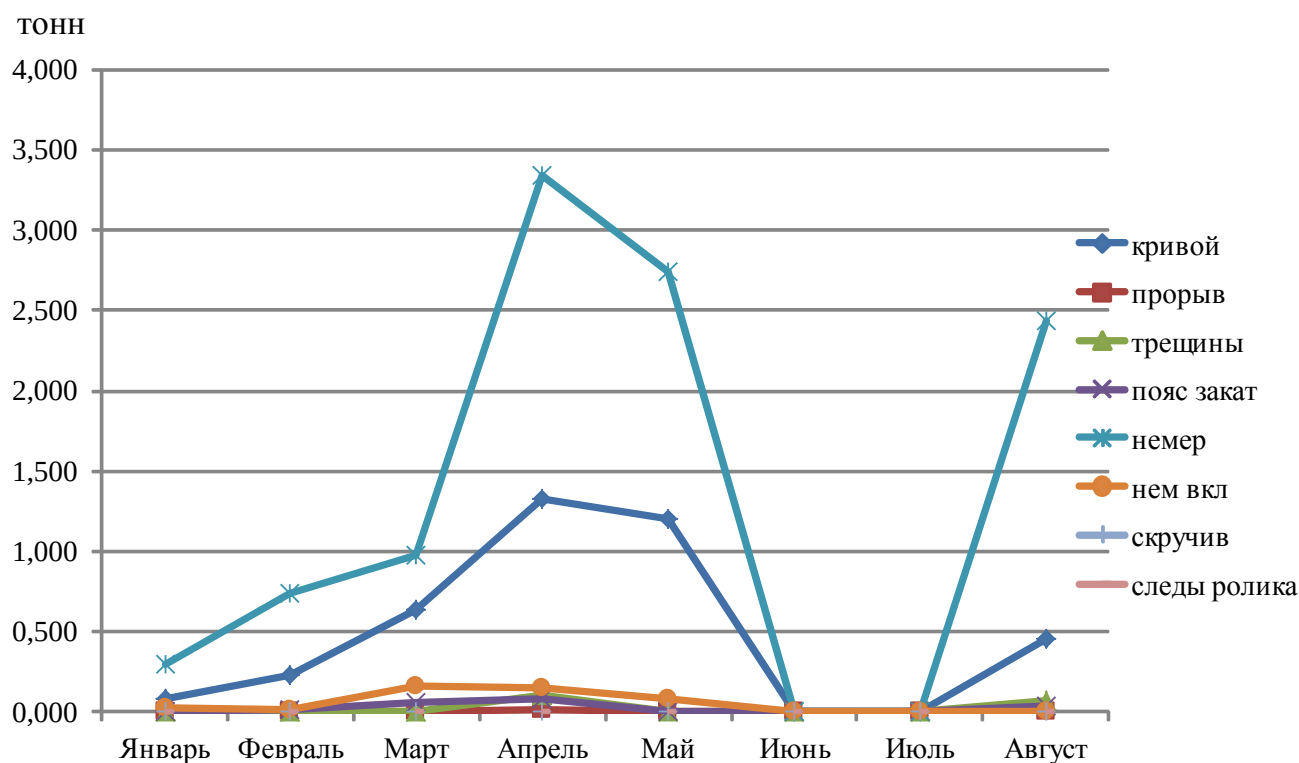


Рис. 2. Виды дефектов непрерывно-литых заготовок и тоннаж дефектных заготовок на примере производственных данных восьми месяцев 2014 г.

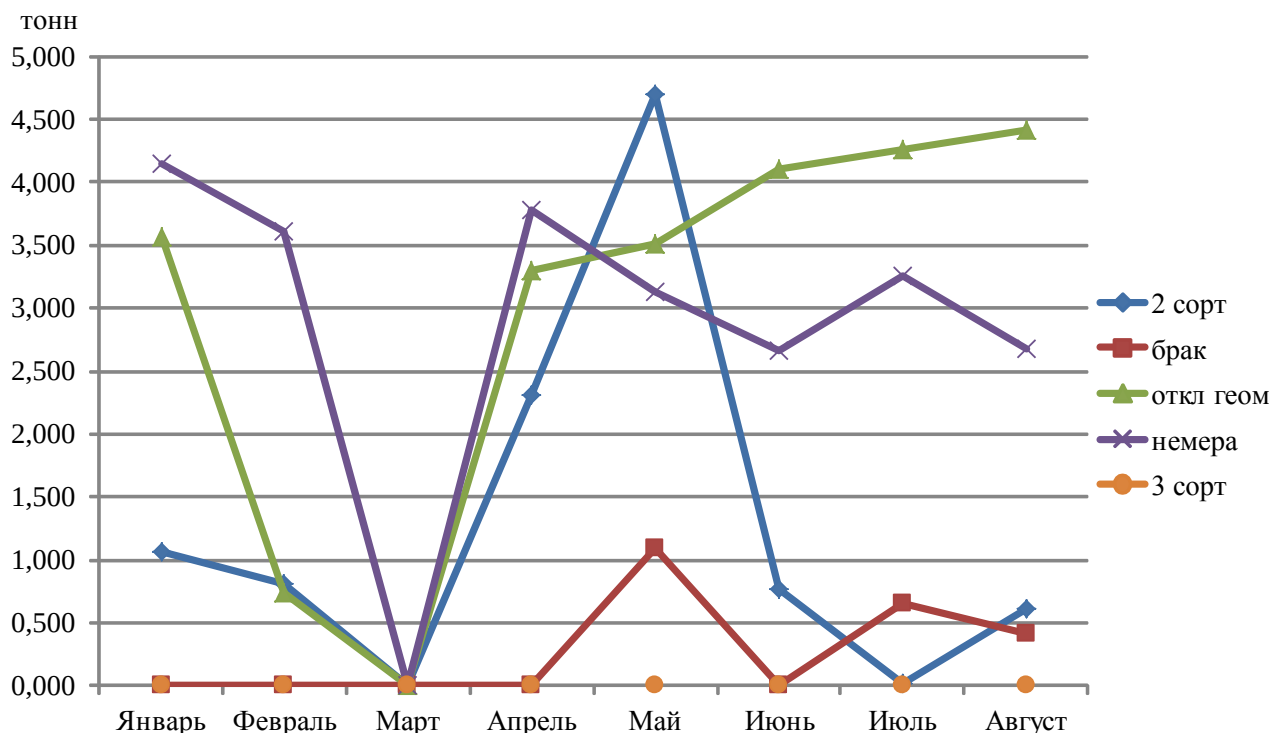


Рис. 3. Виды дефектов готового проката и тоннаж дефектной продукции на примере производственных данных восьми месяцев 2014 г.

Из графиков (рис. 2) обнаруженных дефектов за 2014 г. видно, что основными проблемами при производстве заготовки являются вопросы обеспечения геометрии и вопросы обеспечения длины заготовок при порезке на мерные длины, что связано с низким технико-технологическим уровнем существующего производства.

Информация, представленная предприятием, о часто встречающихся дефектах прокатной продукции (см. рис. 3) позволяет убедиться в том, что на действующих прокатных станах имеется недостаточный контроль качества готовой продукции.

Рекомендации по контролю качества

Объем продукции, производимой станами после планируемой реконструкции, будет 74,2 и 83,3 % (от объема выплавляемой стали) соответственно, следовательно, потребителю в большей степени будет интересно качество производимого проката.

Поэтому в процессе модернизации производства следует:

- интегрировать в процесс профилемеры (приборы для измерений сечения проката непосредственно в работающей линии стана);
- необходимо ввести системы учета и контроля геометрических размеров слабов, произво-

димых на МНЛЗ. Слябы, поступающие в холодном состоянии в печи прокатных станов, должны обязательно подвергаться измерениям и контролю геометрии формы сечения, что важно для исключения (сокращения) ромбовидной заготовки.

С целью оперативного изучения причин возникновения дефектов и отклонений используют принцип сквозного прослеживания движения металла на всех стадиях его производства – для этого необходимо ввести строгую дисциплину по учёту и маркировке проката, синхронизированную с корпоративной информационной системой.

Для развития системы менеджмента качества рекомендуется начать с применения стандартных, международных методов управления качеством. Также рекомендуется использовать известные статистические методы:

- оценка описательных статистик с целью общего изучения выборки;
- анализ возможностей и управляемости процесса;
- изучение характеристик качества процесса (например, индекс пригодности и индекс воспроизводимости процесса);
- использование корреляционного анализа, парного и множественного регрессионного анализа;

- для проведения эффективного выборочного контроля по количественным и качественным признакам необходимо обучить этому персонал лабораторий;

- для оценивания выхода несоответствующей продукции можно применять соответствующий статистический подход на основе распределения Гаусса;

- для прогнозирования параметров (характеристик) процесса и качества продукции рекомендуется использовать нейросетевое программирование.

Следует помнить, что для эффективной работы статистических методов на предприятии нужно обеспечить качественную (эффективную) работу системы менеджмента качества, позволяющую собирать и подготавливать достоверные исходные данные. Основой долгосрочного и устойчивого развития производства в существующих экономических условиях должна стать отлаженная система подготовки как верхнего, так и среднего уровня руководящих кадров. Причем обязательным элементом такой подготовки следует предусмотреть организацию занятий и стажировок на международном уровне с их проведением на передовых отраслевых предприятиях и в научно-образовательных учреждениях, например, в рамках деятельности инжиниринговых центров и базовых кафедр, обладающих университетской базой и имеющих отраслевой и межрегиональный статус.

Это также даст возможность формировать и реализовывать международные программы подготовки и повышения квалификации для металлургического машиностроения и металлургии, включая подготовку высококвалифицированных инженерных, технических и управленческих кадров, и создать новые специализированные гибкие программы [5].

Примером такого сотрудничества могут служить международные программы подготовки и повышения квалификации кадров для новых технологических линий по производству стали и проката, реализованные компанией «МЕТАЛЛУРГМАШ Инжиниринг» совместно с МГТУ им. Г.И. Носова и ОАО «ММК».

Основные положения международного образовательного проекта:

1. Повышение квалификации на базе МГТУ осуществляется для опытных и перспективных работников завода Хосе Марти.

2. Программа предполагает подготовку по

адаптивным программам в МГТУ в течение 5 лет не менее 300 специалистов завода Хосе Марти, имеющих базовую профессиональную подготовку по следующим направлениям – электро-сталеплавильное производство и непрерывная разливка, прокатное производство, механическое оборудование металлургических заводов, электропривод и автоматизация, автоматизированное управление системами.

3. Участниками программы повышения квалификации будут 50–60 человек ежегодно. Группы слушателей курсов будут включать работников всех перечисленных специальностей (по 2–4 человека).

4. Программа курсов рассчитана на 3 месяца. Структура обучения включает теоретическую подготовку, занятия на тренажёрах и практическую стажировку на ведущих предприятиях отрасли. Содержание теоретического обучения и акценты практических занятий по формированию профессиональных навыков могут изменяться по согласованию с представителями завода Хосе Марти и зависеть от уровня профессионального образования, производственного опыта и специализации слушателей группы.

5. Слушатели направляются в МГТУ им. Г.И. Носова, имея поставленную научно-производственную задачу для её решения в рамках своего обучения.

6. По окончании двухнедельного общего теоретического курса обучения слушателей разделяют на специализированные подгруппы по 3–4 человека: ЭСПЦ, прокатное производство, электропривод и автоматика. Через месяц очных занятий технологи и операторы завода Хосе Марти направляются на обучение навыкам работы на новом оборудовании с помощью тренажеров-симуляторов, а специалисты по ремонту и обслуживанию проходят стажировку в ЗАО «КонсОМ СКС» и ООО «ОСК» согласно графику ремонтов, проводимых в ОАО «ММК». После освоения тренажеров и получения новых профессиональных компетенций со сдачей промежуточного комплексного экзамена по пройденному материалу все слушатели курсов направляются на стажировку в ОАО «ММК», реализуя возможность консультаций с руководителями от производства и от МГТУ в очной форме.

7. По окончании всего срока обучения слушатели проходят процедуру итоговой аттестации объединенной комиссией, включающей преподавателей МГТУ им. Г.И. Носова, представителей КЦПК Персонал, руководства ЗАО

«КонсОМ СКС», «ОСК» и завода Хосе Марти в лице руководителя группы слушателей от завода. По итогам аттестации выдаются Сертификаты установленного образца о повышении квалификации и стажировке в ОАО «ММК».

8. Организационные и финансовые вопросы проведения Программы решаются через Компанию МЕТАЛЛУРГМАШ Инжиниринг, которая выполняет роль организатора и технического заказчика Программы МГТУ в интересах завода Хосе Марти.

Так, практическую реализацию программы формирования профессиональных компетенций на примере одной из групп численностью 15 человек, прошедших обучение в 2016 году, можно охарактеризовать следующими показателями:

- Наименование модулей программы:
 - электросталеплавильное производство и непрерывная разливка;
 - оборудование и технология сортопрокатного производства;
 - энергетика, электропривод и автоматизированные системы управления металлургическим производством.
- Формирование групп и подгрупп по специализации:
 - 1 подгруппа – Технологи – 8 чел.:
 - *часть 1* – оператор поста управления прокатного стана – 3 чел.;
 - *часть 2* – оператор ДСП и МНЛЗ – 5 чел.;
 - 2 подгруппа – Техническое обслуживание – 7 чел. (электрики, механики, автоматчики):
 - прокатные станы – 2 чел.;
 - ДСП и МНЛЗ – 2 чел.;
 - энергосистемы – 3 чел.
- Срок обучения группы – 3 месяца, из них:
 - теоретическое обучение – 1,5 мес;
 - количество преподавателей, участвующих в обучении, – 21;
 - количество привлечённых кафедр университета – 7;
 - общее количество часов, проведенных преподавателями – 700;
 - за всё время обучения – 320 аудиторных часов на слушателя;
 - за 1 месяц – 160 аудиторных часов на слушателя;
 - за 1 неделю – 20 аудиторных часов (из них 4 консультации);
 - за 1 день – 6–8 аудиторных часов;

- стажировка – 1,5 мес:
 - тренажеры в МГТУ;
 - ОАО «ММК» в соответствии с графиком ремонтов;
 - ЗАО «КонсОМ»;
 - СКС;
 - ООО «ОСК»;
 - Центр подготовки кадров «Персонал»;

• Результаты подготовки группы (средний балл):

- Входной тестовый контроль – 47,5%;
- Промежуточный контроль после теоретической подготовки – 89%;
- Итоговый контроль после прохождения стажировки – 99%.

Представитель руководства металлургического завода Кубы, начальник отдела кадров Хосинта Эрнандес Лопес признала, что слушателями показан очень высокий для них результат. Ведь не все слушатели группы, за плечами которых большой производственный стаж от 11 до 30 лет, имеют высшее образование. Многие уже более 20 лет не садились за парты, а представленная им программа обучения отличалась большой насыщенностью, высоким образовательным, техническим и даже научным уровнями. Иногда возникали сомнения, удастся ли достичь поставленной цели? Но теперь сомнения позади, а результат превзошел все ожидания. Особенно ценно то, что слушатели получили подготовку в логической связи всех металлургических процессов: выплавка стали, прокатка, гидравлика, механика, энергетика, электрика.

Важным организационным и методическим моментом является существенная помощь, оказанная переводчиками, – представителями кубинской диаспоры, проживающими в г. Магнитогорске и работающими на промышленной площадке ММК, а также переводчиком-куратором группы Феликсом Омаром Пересом – бывшим работником завода им. Хосе Марти, который более 30 лет назад учился в России, поэтому в совершенстве владеет русским и испанским, разговорным и профессиональным языком со знанием специфики и терминологии в металлургической отрасли.

Заключение

Экономическая составляющая международного сотрудничества предполагает формирование технологического кластера, реализующего производственный потенциал «Россия – Куба» в области металлургии и машиностроения (рис. 4).

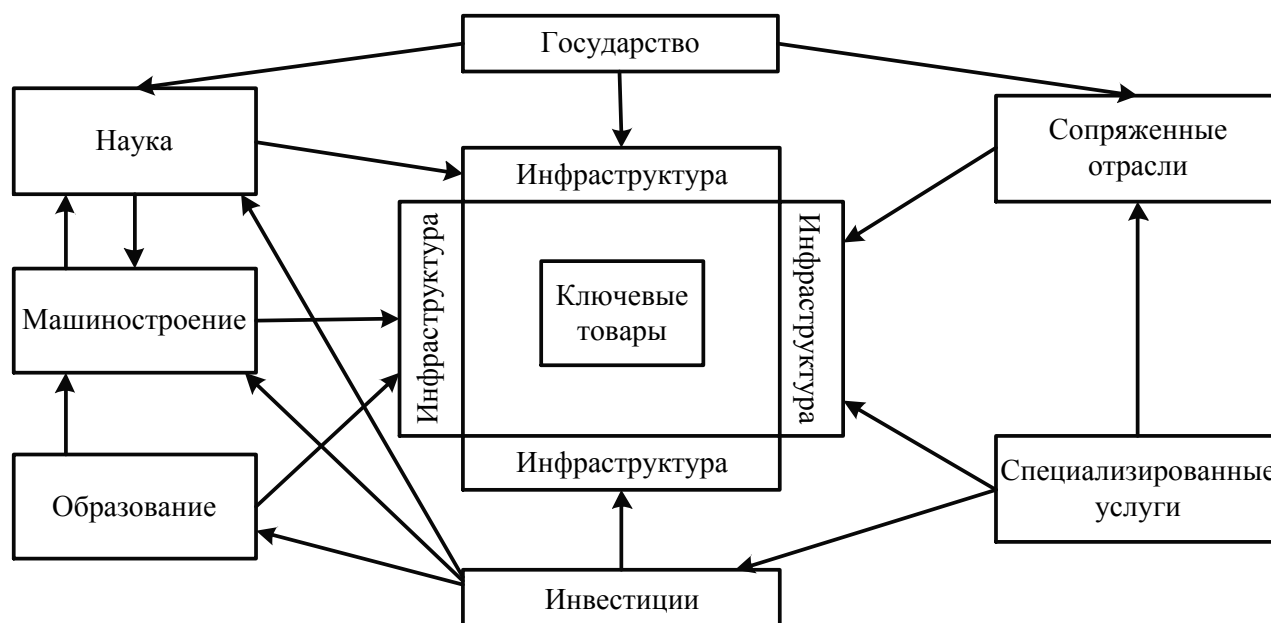


Рис. 4. Принципиальная структура экономического кластера

Практика развития кластеров показывает, что они:

– во-первых, обеспечивают более эффективный доступ к требуемым ресурсам и специализированным факторам производства (новому оборудованию и технологиям, квалифицированному персоналу, развитой инфраструктуре, включая подготовку кадров и проведение НИОКР, и т.д.) [6, 7];

– во-вторых, кластеры облегчают движение информационных потоков внутри кластера и накапливают специализированную информацию (знания), доступ к которой лучше организован и требует меньших издержек;

– в-третьих, внутри себя кластеры обеспечивают взаимодополняемость различных видов деятельности (по удовлетворению покупательского спроса, маркетингу, закупкам), повышая тем самым качество и эффективность работы [8, 9].

Разработка подобного кластера, несомненно, требует приложения усилий и специалистов от всех заинтересованных сторон и может реализовываться на базе Единого Специализированного Центра по подготовке и переподготовке кадров для отрасли, обладающего университетской базой и тесными научно-производственными связями, который, очевидно, объединит в себе лучшие силы, способные системно разработать структуру и документарную основу кластера, учитывающего интересы всех участников на всех уровнях экономического и политического сотрудничества.

Опыт формирования подобных кластеров, объединяющих как предприятия, производящие оборудование, инжиниринговые компании, так и научные организации, разрабатывающие современные технологии в металлургии и машиностроении, у российских организаций уже имеется [7, 10, 11].

Кроме этого в рамках дальнейшего развития международного научно-образовательного проекта предусмотрена подготовка молодых и перспективных выпускников кубинских вузов по форме магистратуры на базе МГТУ им. Г.И. Носова с выполнением выпускной квалификационной работы по актуальным тематикам их места работы на заводе Хосе Марти.

Список литературы

1. Моллер А.Б., Лимарев А.С., Каледина О.С. Управление качеством продукции на основе инновационной стратегии предприятия // Известия Юго-Западного государственного университета. 2015. Т. 1. № 4 (61). С. 45–50.
2. Колокольцев В.М., Разинкина Е.М., Глухова А.Ю. Подготовка квалифицированных кадров в условиях университетского комплекса // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2010. Т. 12. № 1–2. С. 615–618.
3. Гун Г.С. Система подготовки научных кадров для промышленности в ГОУ ВПО «МГТУ» // Черные металлы. 2011. № 56. С. 10–13.
4. Козлова Т.В. К вопросу о стратегии повышения конкурентоспособности фирмы // Традиционные национально-культурные и духовные ценности как фундамент инновационного развития России. 2015. № 1 (7). С. 40–43.
5. Optimization of long products rolling and cutting technology based on modern IT / S.Y. Sarancha, S.A. Levandovskiy, J.S. Statsenko, A.B. Moller, D.I. Kinzin // Cis iron and steel

- review. 2014. № 9. Р. 44–49.
6. Кульков И.В. Паритеты БРИКС // ЮНИДО в России. 2012. №8. С. 55–59.
 7. Гибкие решения в технологии и подготовке кадров: позитивный опыт сотрудничества с компанией DANIELI / О.Н. Тулупов, А.Б. Моллер, Д. Нигрис, М.В. Чукин, Д.И. Кинзин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 1 (45). С. 81–85.
 8. Опыт исследования качества заготовки и сортового проката в системе менеджмента качества (СМК) металлургического завода Хосе Марти (Куба) / Н.А. Тулупова, Х.А. Гуэрра, С.А. Левандовский, Д.И. Кинзин, С.Ю. Саранча // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. № 2 (50). С. 70–79.
 9. Tulupov O.N., Moller A.B. Simulation of bar rolling: experience at Nosov Magnitogorsk state technical university // Steel in Translation. 2014. Т. 44. № 4. Р. 280–288. doi: 10.3103/S0967091214040172
 10. Повышение точности прокатки сортовых профилей простой и фасонной форм / О.Н. Тулупов, А.Б. Моллер, Д.И. Кинзин, С.А. Левандовский, Р.В. Новицкий, С.С. Рычков // Металлургические процессы и оборудование. 2013. №4(34). С. 99–105.
 11. Гун, Г.С. Роль комплексных научных коллективов в повышении квалификации (методологические подходы и опыт работы МГТУ) // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2009. №2. С. 17–19.

Материал поступил в редакцию 11.10.16.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-4-106-114

QUALITY MANAGEMENT AND REVAMPING IN STEEL AND LONG PRODUCT INDUSTRIES REALISED THROUGH PERSONNEL TRAINING WITHIN A RUSSIAN-CUBAN PARTNERSHIP

Oleg N. Tulupov – D.Sc. (Eng.), Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia.

Industry expert of the engineering branch within the Delovaya Rossiya Business Association,

Vice-President of the International Association of Metallurgical Equipment Producers,

President of METALLURGMASH Engineering, Moscow, Russia. E-mail: o.tulupov@mail.ru

Alexander B. Moller – D.Sc. (Eng.), Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. E-mail: amoller@mail.ru. ORCID:

<http://orcid.org/0000-0001-9090-2080>

Alexander V. Nalivayko – Deputy General Director

Institut Tsvetmetobrabotka OJSC, Moscow, Russia.

Miguel Solarana Reyes – General Director

Antillana de Acero Steel Works, Cuba.

José Alonso Guerra – Deputy General Director

Antillana de Acero Steel Works, Cuba.

Abstract

Problem Statement (Relevance): This article is about the international cooperation in the metallurgical industry, which is a priority industrial cluster driving the economy. Constant striving for better flexibility and cost-effectiveness makes searching for new ways to control and improve product quality, staff competence and technological factors an extremely relevant task. **Objective:** The efficiency of a metallurgical enterprise depends on how competent personnel it employs. Personnel is the main resource for the quality management system, as it is social rather than technical factors that enable to ensure and improve the quality. That is why the management teams who strive for sustainable growth should seek to improve the level of expertise available within their organisations. **Methods Applied:** Adaptive training programmes designed for start-up projects in the steel industry of Russia and other countries proved to be one of the

most successful projects implemented by NMSTU in cooperation with Magnitogorsk Iron and Steel Works, with METALLURGMASH Engineering acting as the project coordinator. **Originality:** In February through April 2016, fifteen workers from Antillana de Acero in Cuba took part in a pilot educational project under the following program: “The operation and resources for modern metallurgical complexes producing steel and long products”. Being a part of the agreement between the Russian and the Cuban governments, this project is aimed at revamping the Cuban plant. **Findings:** The participants of this large-scale project included: Antillana de Acero, a metallurgical plant named after José Martí, which is a part of the GESIME Group (formerly, ACINOX); NMSTU; Magnitogorsk Iron and Steel Works; METALLURGMASH Engineering; KonsOM SKS; Personal, a personnel training center. **Practical Relevance:** There were designed two ways for this international sci-

entific and educational project to continue and evolve. The first way is through continued three-month training courses and through internships with the metallurgical enterprise designed for groups of up to 300 students. The second way is through Master's programmes realised by NMSTU and designed for young and promising graduates from Cuba. For such students, the subjects of their graduation papers should be related to the jobs they do at the Antillana de Acero plant.

Keywords: Industrial cluster, technological platform, innovative partnership, expertise, international training programmes, knowledge management, innovative technologies, performance appraisal, the level of competence.

References

1. Moller A.B., Limarev A.S., Kaledina O.S. Product quality management as part of a corporate innovation strategy. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the South-Western State University]. 2015, vol. 1, no. 4 (61), pp. 45–50. (In Russ.)
2. Kolokoltsev V.M., Razinkina E.M., Glukhova A.Yu. Preparation of qualified personnel by a university. *Izvestiya Samar-skogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2010, vol. 12, no. 1–2, pp. 615–618. (In Russ.)
3. Gun G.S. Industrial research personnel training at NMSTU. *Chernye metally* [Ferrous metals]. 2011, no. 56, pp. 10–13. (In Russ.)
4. Kozlova T.V. On the strategy of obtaining a competitive edge. *Traditsionnye natsionalno-kulturnye i dukhovnye tsennosti kak fundament innovatsionnogo razvitiya Rossii* [Traditional cultural values as a fundament for the innovative development of Russia]. 2015, no. 1 (7), pp. 40–43. (In Russ.)
5. Sarancha S.Y., Levandovskiy S.A., Statsenko J.S., Moller A.B., Kinzin D.I. Optimization of long products rolling and cutting technology based on modern IT. *Cis iron and steel review*. 2014, no. 9, p. 44–49.
6. Kulkov I.V. The parities of BRICS. *YuNIDO v Rossii* [UNIDO in Russia]. 2012, no. 8, pp. 55–59. (In Russ.)
7. Tulupov O.N., Moller A.B., Nigris D., Chukin M.V., Kinzin D.I. Flexible solutions for the technology and personnel training: A showcase of successful collaboration with DANIELI. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I.Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2014, no. 1 (45), pp. 81–85. (In Russ.)
8. Tulupova N.A., Guerra H.A., Levandovskiy S.A., Kinzin D.I., Sarancha S.Yu. A case study: Looking at the quality of billets and long products within the quality management system adopted at Antillana de Acero Steel Works (Cuba). *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I.Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2015, no. 2 (50), pp. 70–79. (In Russ.)
9. Tulupov O.N., Moller A.B. Simulation of bar rolling: experience at Nosov Magnitogorsk state technical university // *Steel in Translation*. 2014, vol. 44, no. 4, pp. 280–288. DOI: 10.3103/S0967091214040172
10. Tulupov O.N., Moller A.B., Kinzin D.I., Levandovskiy S.A., Novitskiy R.V., Rychkov S.S. Improving the rolling accuracy of plain and shaped steel sections. *Metallurgicheskie protsessy i oborudovanie* [Metallurgical processes and equipment], 2013, no. 4(34), pp. 99–105. (In Russ.)
11. Gun G.S. The role of combined research teams in competence enhancement. The methodological approaches and the experience of NMSTU. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I.Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2009, no. 2 (26), pp. 17–19. (In Russ.)

Received 11/10/16

Управление качеством при модернизации оборудования и процессов (сталь-сортной прокат) на основе повышения квалификации кадров в рамках российско-кубинского сотрудничества / Тулупов О.Н., Моллер А.Б., Наливайко А.В., Райес М.С., Гуэрра Х.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т.14. №4. С. 106–114. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-4-106-114

Tulupov O.N., Moller A.B., Nalivayko A.V., Reyes M.S., Guerra J.A. Quality management and revamping in steel and long product industries realised through personnel training within a russian-cuban partnership. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 4, pp. 106–114. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-4-106-114

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Алексеев Даниил Юрьевич – аспирант, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: D.U.Alekseev@mail.ru

Беляев Сергей Владимирович – д-р техн. наук, доц., зав. кафедрой литейного производства, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия. E-mail: 244812@mail.ru

Боброва Ольга Борисовна – ст. преп. кафедры промышленной экологии и безопасности жизнедеятельности, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: obproshkina@mail.ru

Богданова Татьяна Александровна – канд. техн. наук, начальник металлургического отдела, ООО «КиК», Красноярск, Россия. E-mail: bat@kandk.ru

Волкова Елена Александровна – канд. техн. наук, доц. кафедры промышленной экологии и безопасности жизнедеятельности, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: valena.dom@rambler.ru

Гаманюк Сергей Борисович – канд. техн. наук, доц. кафедры «Технология материалов», Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия. E-mail: tecmat@vstu.ru

Гильманшина Татьяна Ренатовна – канд. техн. наук, доц. кафедры литейного производства, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия. E-mail: gtr1977@mail.ru

Голубчик Эдуард Михайлович – д-р техн. наук, доц. кафедры технологии обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: golub66@mail.ru

Гречников Федор Васильевич – д-р техн. наук, академик РАН, первый заместитель председателя Самарского научного центра Российской академии наук, зав. кафедрой обработки металлов давлением, ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (Самарский университет), Самара, Россия. E-mail: gretch@ssau.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3767-4004>

Гущина Марина Сергеевна – магистрант, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

Гуэрра Хосе Алонсо – зам. генерального директора металлургического завода Хосе Марти, Куба.

Десницкий Владимир Владимирович – д-р техн. наук, проф. кафедры «Материалы, технологии и оборудование литейного производства», ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург, Россия, Россия.

Дронов Алексей – аспирант, ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия.

Дыя Хенрик – д-р техн. наук, проф., директор института формоизменения и инженерной безопасности Ченстоховского технологического университета, Ченстохова, Польша. E-mail: dyja@wip.pcz.pl

Ерисов Ярослав Александрович – канд. техн. наук, доц. кафедры обработки металлов давлением, ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (Самарский университет), Самара, Россия. E-mail: yaroslav.erisov@mail.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9750-8211>

Загиров Николай Наильич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Обработка металлов давлением», ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия. E-mail: kafomd_1@mail.ru

Зюбан Николай Александрович – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Технология материалов», Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия. E-mail: tecmat49@vstu.ru

Иванов Евгений Владимирович – ст. преп. кафедры «Обработка металлов давлением», ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия. E-mail: kafomd_1@mail.ru

Илларионов Илья Егорович – д-р техн. наук, проф., академик РАЕН, заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, заслуженных деятель науки Чувашской Республики, зам. зав. кафедрой материаловедения и металлургических процессов, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, Чебоксары, Россия.

Карамышев Андрей – доц., канд. техн. наук, ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия. E-mail: Andrey.karamyshev@yandex.ru

Корнилов Геннадий Петрович – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой электроснабжения промышленных предприятий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: 8 (3519) 29-84-79. E-mail: korn_mgn@mail.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2451-3850>

Курмачев Юрий Федорович – канд. техн. наук, доц., Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия. E-mail: kurmach@mail.ru

Логинов Юрий Николаевич – д-р техн. наук, проф. кафедры «Обработка металлов давлением», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет», Екатеринбург, Россия. E-mail: unl@mtf.ustu.ru

Лукьянова Ксения Сергеевна – аспирантка, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: lukks@list.ru

Моллер Александр Борисович – д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: amoller@mail.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9090-2080>

Муталлапова Файна Фаннуровна – магистрант кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: faina_urmanova@mail.ru

Набатчиков Дмитрий Геннадьевич – канд. техн. наук, ассистент, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: +7(3519)29-85-25.

Наливайко Александр Владимирович – заместитель генерального директора, ОАО «Институт Цветметобработка», Москва, Россия.

Некрасов Игорь – доц., канд. техн. наук, ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия. E-mail: Nekrasovii@yandex.ru

Никифоров Геннадий – д-р техн. наук, председатель совета директоров ЗАО «Магнитогорскгазстрой», Магнитогорск, Россия; Земмеринг, Австрия. E-mail: alexxnik@hotmail.com

Николаев Александр Аркадьевич – канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой автоматизированного электропривода и мехатроники, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: 8 (3519) 22-45-87. E-mail: aa.nikolaev@magtu.ru, alexniko@inbox.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5014-4852>

Ольховик Евгений Олегович – канд. техн. наук, доц. кафедры «Основы инженерного проектирования», ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», Санкт-Петербург, Россия. olhovick@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9305-0784>

Парсункин Борис Николаевич – д-р техн. наук, проф. кафедры автоматизированных систем

управления, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел. (3519)298558. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1822-2632>

Партыко Евгений Геннадьевич – аспирант, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия.

Паршин Владимир Сергеевич – проф., д-р техн. наук, ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия. E-mail: Netskater@mail.ru

Перятинский Алексей Юрьевич – канд. техн. наук, доц., и.о. зав. кафедрой промышленной экологии и безопасности жизнедеятельности, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

Полецков Павел Петрович – д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел. +7(3519)29-85-25. E-mail: pavel_poletskov@mail.ru

Пузиков Артем Ярославич – аспирант кафедры «Технология материалов», Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия. E-mail: tecmat@vstu.ru

Райес Мигель Соларана – генеральный директор металлургического завода Хосе Марти, Куба.

Рубин Геннадий Шмульевич – канд. техн. наук, доц. кафедры технологий, сертификации и сервиса автомобилей, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: rubin@mgn.ru

Руцкий Дмитрий Владимирович – канд. техн. наук, доц. кафедры «Технология материалов», Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия. E-mail: tecmat@vstu.ru

Рябчиков Михаил Юрьевич – канд. техн. наук, доц. кафедры автоматизированных систем управления, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: (3519)29-85-58. E-mail: mr_mgn@mail.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5337-0951>

Рябчикова Елена Сергеевна – ст. преп. кафедры автоматизированных систем управления, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: (3519)29-85-58. E-mail: mika.elena@mail.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6441-1157>

Свиридова Татьяна Валерьевна – канд. техн. наук, доц. кафедры промышленной экологии и безопасности жизнедеятельности, ФГБОУ ВО «Магнито-

горский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: ntv_3110@mail.ru

Сомова Юлия Васильевна – канд. техн. наук, доц. кафедры промышленной экологии и безопасности жизнедеятельности, зам. директора института естествознания и стандартизации по учебной работе, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: yuliya.somova.82@mail.ru

Стеблянок Валерий Леонтьевич – д-р техн. наук, проф. кафедры химии, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: v.steblyanko@mail.ru

Стрельников Игорь Анатольевич – канд. техн. наук, доц. кафедры материаловедения и металлургических процессов, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, Чебоксары, Россия.

Сурудин Сергей Викторович – канд. техн. наук, инженер кафедры обработки металлов давлением, ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (Самарский университет), Самара, Россия. E-mail: innosam63@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2479-2316>

Тулупов Олег Николаевич – д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», эксперт отраслевого объединения «Инжиниринг» в общественном объединении «Деловая Россия», вице-президент Международного союза производителей металлургического оборудования, президент «Металлургмаш Инжиниринг», Москва, Россия. E-mail: o.tulupov@mail.ru

Усанов Михаил Юрьевич – ст. преп. кафедры металлургии и стандартизации, филиал ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» в г. Белорецке. E-mail: barracuda_m@mail.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5920-3449>

Усков Данил Игоревич – ассистент кафедры литейного производства, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия.

Усков Игорь Васильевич – канд. техн. наук, доц. кафедры литейного производства, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия. E-mail: uskov59@mail.ru

Федулов Артем Анатольевич – доц., канд. техн. наук, ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия. E-mail: Artem.feduloff@yandex.ru

Хакимуллин Константин – инженер-проектировщик, Hosokawa kolb GMBH, Бонн, ФРГ. E-mail: khakimullin@hosokawa-kolb.de

Харитонов Вениамин Александрович – канд. техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: (3519) 29-84-82. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3487-7110>

Хорев Валерий – аспирант, ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия.

Храмшин Тимур Рифхатович – канд. техн. наук, доц. кафедры электроснабжения промышленных предприятий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: 8 (3519) 29-84-16 E-mail: timur.hramshin@mail.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0129-3653>

Чубуков Михаил Юрьевич – аспирант кафедры «Технология материалов», Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия. E-mail: tecmat@vstu.ru

Чукин Михаил Витальевич – д-р техн. наук, проф., первый проректор-проректор по научной и инновационной работе, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: chukin@magtu.ru

УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

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

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

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

ТРЕБОВАНИЯ К СТАТЬЯМ, ПРИНИМАЕМЫМ К ПУБЛИКАЦИИ

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

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

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

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

Онлайн-перевод запрещается!

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

2. СТРУКТУРА ОСНОВНОЙ ЧАСТИ СТАТЬИ

2.1. Введение (постановка проблемы)

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

2.3. Результаты исследования и их обсуждение

2.4. Заключение (выводы)

2.5. Список литературы (на русском и английском языках)

3. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

3.1. Рекомендуемый объем статьи – 6–8 стр.

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

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

- **шрифт** – **Times New Roman**, размер – 11 пт, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический;
- при вставке **формул** использовать встроенный редактор формул **Microsoft Equation** со стандартными установками, применяется только сквозная нумерация;
- **иллюстрации** не должны превышать ширины колонки (80 мм) или ширины страницы (170 мм). Для подписей элементов на иллюстрации используется шрифт TimesNewRoman 11 пт. Рисунки представляются в редакцию в двух форматах: редактируемом и не редактируемом (*.jpg; качество не менее 300 dpi). В тексте статьи должны быть подрисовочные подписи в местах размещения рисунков. В конце подписи к рисунку точка не ставится. Например:

Рис. 4. Расчётная зависимость $\chi(t) = I_m/I_{n0}$ от времени и удалённости КЗ от выводов асинхронного двигателя

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

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

4. ДОКУМЕНТЫ, ПРИЛАГАЕМЫЕ К СТАТЬЕ

4.1. Экспертное заключение о возможности опубликования.

4.2. Договор.

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

Статьи проходят обязательное научное рецензирование.

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

По вопросам публикации статей обращаться: 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Редколлегия журнала «Вестник МГТУ им. Г.И. Носова», М.В. Чукину. Телефоны: (3519) 29-85-26, 22-14-93.

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