

ВЕСТНИК

Магнитогорского государственного
технического университета им. Г. И. Носова

№2 (50) июнь 2015 г.

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

Издается с марта 2003 года

Редакционный совет

Председатель редсовета:

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

Члены редсовета:

Горлач И. – д-р наук в области машиностроения;
руководитель отделения мехатроники университета
им. Нельсона Манделы, Южная Африка;
Дабала М. – профессор, Факультет промышленного
инжиниринга Университета г. Падуа, Италия;
Дуб А.В. – советник ген. директора
ОАО НПО «ЦНИИТМАШ»,
д-р техн. наук, Москва, Россия;
Дыя Х. – проф., д-р техн. наук, директор
Института обработки металлов давлением
и инженерии безопасности, Ченстоховский
Технологический Университет, Ченстохова, Польша;
Дюссан Р.О. – профессор, Руководитель
факультета металлургических технологий
и наук о материалах, Технологический
институт, Мумбай, Индия;
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;

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

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

Главный редактор:

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

Первый зам. главного редактора:

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

Зам. главного редактора:

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

Ответственные секретари:

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

Редактор: Кутекина Н.В.

Технический редактор: Гаврусева К.В.

Перевод на английский: Сухих О.Е.

© ФГБОУ ВПО «МГТУ», 2015

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

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

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

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

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

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

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

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

Адрес редакции:

455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38
Тел.: (3519) 22-14-93. Факс (3519) 23-57-60
URL: <http://www.vestnik.mgtu.ru>
E-mail: rio_mgtu@mail.ru; vestnik@mgtu.ru

Журнал подготовлен к печати издательским центром
МГТУ им. Г.И.Носова, 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38.
Отпечатан на полиграфическом участке МГТУ им. Г.И. Носова,
455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38.
Выход в свет 25.06.2015. Заказ 470. Тираж 500 экз. Цена свободная.

VESTNIK

of Nosov Magnitogorsk State Technical University

No. 2 (50) June 2015

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

PUBLISHED SINCE MARCH, 2003

Editorial Board Members

Chairman:

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

Honorary Board Members:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Editor-in-Chief:

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

First Deputy Editor-in-Chief:

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

Deputy Editor-in-Chief:

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

Executive Editors:

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

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

Editor: Kutekina N.V.

Technical Editor: Gavrusseva K.V.

Translated into English: Sukhikh O.E.

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

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

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

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

Editorial office:

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

Prepared for the publication by the NMSTU publishing center,
38, pr. Lenina, city of Magnitogorsk 455000, Russia
Printed by the NMSTU printing section,
38, pr. Lenina, city of Magnitogorsk 455000, Russia.
Publication date: 25.06.2015. Order 470. Circulation: 500. Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

Разработка полезных ископаемых	5
<i>Арефьев С.А.</i> Экспериментальная оценка зависимости качества дорожных одежд от уплотнения их карьерными автосамосвалами	
	5
Транспорт. Транспортные технологии.....	12
<i>Рахмангулов А.Н., Мирсагдиев О.А.</i> Имитационная модель оценки качества передачи речи в сетях оперативно-технологической связи на железнодорожном транспорте	
	12
Металлургия черных, цветных и редких металлов	21
<i>Дружков В.Г., Шишов М.Ю., Прохоров И.Е.</i> Методы определения расхода горячего дутья на отдельно взятую фурму в горне доменной печи	
	21
Обработка металлов давлением	28
<i>Тулупов О.Н., Моллер А.Б., Левандовский С.А., Кинзин Д.И., Олина Анна, Новицкий Р.В., Дзюба А.Ю., Шурьгин В.И., Серпков Е.С.</i> Опыт производства круглого сортового проката из стали марки 60С2ХА с повышенными требованиями к глубине обезуглероженного слоя в условиях ОАО «ММК»	
	28
<i>Лехов О.С., Туев М.Ю.</i> Исследование напряжений в очагах деформации и оценка износа валков универсальных клетей при прокатке широкополочных балок	
	37
<i>Миронов К.А., Козлов А.В., Шеркунов В.Г., Суворов А.Л.</i> Исследование силовых характеристик при гибке труб с обкатыванием, с использованием автоматизированного модуля и ПК	
	45
<i>Трофимов В.Н., Карманов В.В., Панин Ю.В., Корионов М.А.</i> Определение остаточных напряжений при одноосной пластической деформации цилиндрического стержня	
	48
Технологии обработки материалов	54
<i>Баранов В.Н., Довженко Н.Н., Гильманишина Т.Р., Лыткина С.И., Худоногов С.А.</i> Исследование зависимости качества природного скрытокристаллического графита от режимов подготовки	
	54
<i>Загиров Н.Н., Ковалева А.А., Ольховик А.Я., Коваль О.Е.</i> Технологическая оценка возможности получения высокопористого материала из стружковых отходов алюминиевого сплава АД31	
	59
Нanomатериалы и нанотехнологии	65
<i>Коляда Л.Г., Медяник Н.Л., Ефимова Ю.Ю., Кремнева А.В.</i> Синтез и исследование наночастиц серебра и возможность их использования в пищевой упаковке	
	65

CONTENTS

Mining and Mineral Processing.....	5
<i>Arefiev S.A.</i> Experimental evaluation of dependence of pavement characteristics in quarries on compaction of roads with open pit dump trucks.....	
	5
Transport and Transport Systems.....	12
<i>Rakhmangulov A.N., Mirsagdiev O.A.</i> A simulation model of quality assessment of voice transmission in operational and technological networks in railway transport.....	
	12
Metallurgy of Ferrous, Non-Ferrous and Rare Metals	21
<i>Druzhkov V.G., Shirshov M.Yu., Prokhorov I.E.</i> Techniques for measurement of a hot blast volume per tuyere in a blast furnace hearth	
	21
Metal Forming.....	28
<i>Tulupov O.N., Moller A.B., Levandovskiy S.A., Kinzin D.I., Olina Anna, Novitskiy R.V., Dzyuba A.Yu., Shurygin V.I., Serpkov E.S.</i> Experience in the production of round long products of steel grade 60S2KhA with higher requirements to a decarburized layer depth at OJSC MMK	
	28
<i>Lekhov O.S., Tuev M.Yu.</i> Study of stresses in deformation areas and evaluation of wear of rolls of universal stands, when rolling wide-flange beams.....	
	37
<i>Mironov K.A., Kozlov A.V., Sherkunov V.G., Suvorov A.L.</i> The study of power characteristics during pipe bending with burnishing, using an automated module and a pc	
	45
<i>Trofimov V.N., Karmanov V.V., Panin Yu.V., Korionov M.A.</i> Determination of residual stresses in uniaxial plastic deformation of a cylindrical rod.....	
	48
Materials Processing Technology.....	54
<i>Baranov V.N., Dovzhenko N.N., Gilmanshina T.R., Lytkina S.I. Khudonogov S.A.</i> Research on the dependence of the quality of natural cryptocrystalline graphite on its modes of preparation.....	
	54
<i>Zagirov N.N., Kovaleva A.A., Olkhovik A.Ya., Koval O.E.</i> A technological assessment of the possibility of producing a highly porous material from AD31 aluminum alloy chip wastes.....	
	59
Nanomaterials and Nanotechnology.....	65
<i>Kolyada L.G., Medyanik N.L., Efimova Yu.Yu., Kremneva A.V.</i> Synthesis and research on silver nanoparticles and their possible application in food packaging.....	
	65

**Стандартизация, сертификация
и управление качеством 70**

*Тулупова Н.А., Гуэрра Хосе Алонсо,
Левандовский С.А., Кинзин Д.И., Саранча С.Ю.*
Опыт исследования качества заготовки
и сортового проката в системе
менеджмента качества (СМК)
металлургического завода Хосе Марти (Куба)..... 70

Данилова Ю.В., Полякова М.А., Рубин Г.Ш.
Поиск консенсуса между потребителем
и производителем – важный этап
при разработке нормативных документов 79

Новые технологические процессы и оборудование 85

*Неусыпин К.А., Пролетарский А.В.,
Кузнецов И.А.* Исследование степени
идентифицируемости параметров
динамических систем..... 85

**Энергетика металлургии, энергосбережение
и электротехнические комплексы 90**

*Николаев А.А., Корилов Г.П.,
Тулупов П.Г., Повелица Е.В.* Анализ различных
вариантов построения систем автоматического
управления перемещением электродов дуговых
сталеплавильных печей и установок Ковш-печь..... 90

**Строительные материалы
и строительные технологии..... 101**

Мирюк О.А. Бесцементные поризованные
композиции..... 101

Сведения об авторах 108

**Standardization, Certification
and Quality Management70**

*Tulupova N.A., Guerra José Alonso,
Levandovskiy S.A., Kinzin D.I., Sarancha S.Yu.*
Experience of research of the billets
and long products quality in the quality management
system at the José Martí
metallurgical plant (CUBA)70

Danilova Yu.V., Polyakova M.A., Rubin G.Sh.
Reaching a consensus between consumers
and manufacturers is an important stage
when developing regulatory documents79

New processes and equipment.....85

*Neusypin K.A., Proletarsky A.V.,
Kuznetsov I.A.* Research on an identifiability
degree of dynamic system
parameters85

**Power Engineering in Metallurgy, Energy Saving
and Electrical Complexes90**

*Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Povelitsa E.V.,
Tulupov P.G.* Study of different methods
to design automated electrode
position control systems for electric
arc furnaces and ladle furnaces90

**Construction Materials
and Construction Technologies.....101**

Miryuk O.A. Porous cement-free
compositions.....101

Information about authors108

РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.271:625.7

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЗАВИСИМОСТИ КАЧЕСТВА ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД ОТ УПЛОТНЕНИЯ ИХ КАРЬЕРНЫМИ АВТОСАМОСВАЛАМИ

Арефьев С.А.

Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

Аннотация. В статье приведена технология уплотнения слоев дорожных одежд на карьерах, позволяющая существенно повысить их эксплуатационные свойства.

Описан опыт строительства карьерных автодорог на карьере ОАО «Ураласбест» и результаты внедрения предложенной технологии.

Выполнена оценка транспортно-эксплуатационных свойств дорожного покрытия на опытном участке, построенном с использованием технологии уплотнения дорожных одежд карьерными автосамосвалами, имеющимися на горном предприятии, без отвлечения их от работы, связанной с транспортированием горной массы.

Установлены закономерности, позволяющие определять количество проходов автосамосвалов, необходимое для достижения требуемой степени уплотнения слоев дорожного покрытия.

Предложенная технология уплотнения и полученные зависимости могут использоваться на горных предприятиях, эксплуатирующих технологические автосамосвалы, с целью повышения технико-экономических показателей работы карьерного транспорта.

Ключевые слова: автодорога, карьер, уплотнение слоев дорожной одежды, технология строительства автодорог, карьерные автосамосвалы.

Введение

С целью повышения качества и эксплуатационных свойств дорожных одежд на карьерах целесообразно применять уплотнение составляющих их слоев [1–6]. При уплотнении получают более прочную и плотную структуру грунта, способную в дальнейшем противостоять внешним воздействиям. Неуплотненная дорожная одежда быстро теряет свои прочностные свойства, деформируется с образованием неровностей и колеиностей, требует частой подсыпки щебня для выравнивания рабочей поверхности, значительных затрат на содержание автодорог. В связи с возрастанием полной массы автосамосвалов нагрузка на дорожную конструкцию постоянно увеличивается, и возрастает значение уплотнения как одной из важнейших операций при сооружении дорожной одежды.

В то же время на большинстве современных карьеров при строительстве дорог не предусматривается проведение специальных работ по уплотнению дорожной одежды. А там, где оно проводится, для выполнения его используется дополнительное дорогостоящее оборудование – грунтовые и пневмоколесные катки. При этом движение на уплотняемых участках автодорог

перекрывается, и они на длительный период исключаются из работы [1, 7].

С целью повышения качества карьерных автодорог и снижения затрат на их строительство, предложена технология, которая позволяет осуществлять уплотнение дорожных одежд с использованием имеющихся на предприятии карьерных автосамосвалов без отвлечения их от работы, связанной с транспортированием горной массы и без осуществления дополнительных затрат на специальное оборудование.

Анализ показывает, что большие нагрузки на колесо автосамосвала и существенные размеры автошин обуславливают значительно увеличенные площади контакта их с поверхностью уплотняемого материала при соизмеримых по сравнению с катками контактных давлениях. Одновременно в 1,5–3,0 раза увеличивается продолжительность контакта. Все это обеспечивает повышение в 2–3 раза глубины активной зоны уплотнения, позволяет снизить необходимое количество проходов по одному месту и значительно повысить производительность процесса уплотнения. Согласно расчетам воздействие большегрузных автомашин на дорожную одежду идентично пневматическим каткам, и глубина воздействия может достигать 0,7–1,2 м [8–10].

Но для действенного и качественного уплотнения карьерными автосамосвалами необходимо соблюдать определенный режим движения автомобилей по уплотняемому участку, режим изменения загрузки автосамосвалов и равномерное распределение движения их по ширине проезжей части автодороги.

Теория и технологические разработки

Технология уплотнения дорожной одежды автосамосвалами включает три стадии:

- подкатку на малой скорости и с минимальной нагрузкой (уплотнение поверхностного слоя и придание ему требуемой плотности);

- укатку или непосредственное уплотнение слоя дорожной одежды на глубину. (Так как глубина проработки зависит от величины нагрузки и времени ее приложения, скорость движения автосамосвала по участку и его загрузка должны повышаться постепенно);

- расклинцовку или окончательное уплотнение (производится на минимальной скорости с максимальной нагрузкой). При этом происходит завершение формирования окончательной структуры материалов дорожной одежды и поверхности придается максимальная ровность и прочность (при уплотнении верхнего слоя).

С целью достижения максимальной плотности материалов дорожной одежды и толщины уплотняемого слоя укатывать участок должны автосамосвалы максимальной грузоподъемности. Перекрытие предыдущего прохода машины последующим проходом производится на ширину одного заднего наружного колеса.

При движении машин по участку без исключения их из процесса транспортирования горной массы производится поочередное уплотнение порожняковой и грузовой полос движения. Вначале уплотняется порожняковая полоса. По ней на первой стадии уплотнения следуют порожние машины, а на 2-й и 3-й стадии – груженные с нагрузкой. Во время уплотнения порожняковой полосы груженными машинами на грузовую полосу направляется движение порожних. Затраты времени в результате снижения скоростей движения на участке уплотнения и потеря производительности автосамосвалов незначительные и зависят от интенсивности движения по данному участку.

Для апробации предложенной технологии, с ее использованием был построен опытный участок карьерной автодороги, расположенный на западном борту центрального карьера ОАО «Ураласбест» на съезде с гор. +92 м на гор. +77 м.

Одновременно с опытным участком исследо-

вания выполнялись на контрольном участке, расположенном на западном борту карьера на автосъезде с гор. +2 м на гор. –13 м, на котором дорожные работы выполнялись по технологии, традиционно используемой в карьере ОАО «Ураласбест» и не предусматривающей проведения специальных работ по уплотнению.

Проходка съезда осуществлялась экскаватором ЭКГ-8И. Так как экскаватор прошел съезд с невыдержанным профилем, производились работы по его выравниванию. Полученный участок делился на захватки длиной 200 м и шириной равной $\frac{1}{2}$ ширины проезжей части. По одной половине захватки осуществлялось движение в грузовом и порожняковом направлении, а на второй отсыпался и планировался выравнивающий слой из мелкораздробленной породы, которую разравнивали гусеничным бульдозером Т-25.01. Затем на первой половине захватки прекращали движение транспорта, производилась отсыпка и планировка выравнивающего слоя. На второй половине, после предварительного увлажнения, производилось уплотнение выравнивающего слоя движущимися автомобилями с регулированием их движения по скорости и по ширине полосы движения.

Перед операцией уплотнения во избежание проколов и порезов автошин отсыпался слой из щебня фракции +40 – +80 мм толщиной 5 см. Планирование этого слоя производил грейдер ДЗ-98. После этого слой увлажнялся поливочной машиной БелАЗ-540 ПМ с расчетом 10 л воды на 1 м². Уплотнение выравнивающего слоя производилось за 4 прохода по одному следу, из которых 2 укатывались автосамосвалами БелАЗ-7555, а еще 2 – автосамосвалами САТ 777F и БелАЗ-75131. Так имитировалась разная степень нагрузки.

Отсыпка слоя основания производилась автосамосвалами БелАЗ-7555 по всей площади съезда таким образом, что расстояние между кучами щебня фракции +40 – +80 мм постепенно возрастало. Это необходимо для наилучшей работы грейдера при планировке. После отсыпки слоя основания производились работы по его разравниванию гусеничным бульдозером ДЭТ-320 и планировке грейдером ДЗ-98.

Уплотнение слоя основания производилось при движении машин БелАЗ-75131, САТ-777F, БелАЗ-7555 по уплотняемому участку без исключения их из процесса транспортирования горной массы, поочередно по порожняковой и грузовой полосам. На завершающей стадии уплотнения производилась отсыпка щебня клинца фракции +5 – +20 мм с помощью скрепера. Параллельно с устройством слоя основания выполнялись работы

по формированию породного вала из дробленой горной массы бульдозером ДЭТ-320.

По приведенному выше принципу формировался слой покрытия. Покрытие отсыпалось из щебня фракции +20 – +40 мм с заклиной щебнем +5 – +20 мм. Покрытие разравнивалось и уплотнялось. На покрытие отсыпался с помощью пескоразбрасывателя щебень клинец, который затем уплотнялся автосамосвалами.

До и после строительства опытного участка проводилась оценка его транспортно-эксплуатационных свойств, которые сравнивались с аналогичными показателями выбранного контрольного участка.

В качестве критериев сравнения опытного и контрольного участков принята плотность слоев дорожной одежды, которая определялась с помощью баллонного плотномера ПБД-КМ, прочность дорожной одежды, определяемая с помощью высокоточного нивелира Н-05, продольная и поперечная ровность и уклоны на поверхности дороги, определяемые при помощи дорожной рейки РДУ-Кондор и нивелира SDL-50, и работоспособность дорожной одежды, определяемая с помощью хронометража.

Оценка плотности, прочности и ровности на опытном участке осуществлялась по каждому слою и по дорожной одежде в целом. На контрольном участке такая оценка производилась по дорожной одежде в целом.

С целью определения количества проходов, необходимого для достижения требуемого коэффициента уплотнения $K_y = 0,95$, проводился отбор проб после каждых 2–3 проходов по одному следу и осуществлялся расчет фактической плотности. Результаты расчетов приведены в таблице.

Зависимость плотности (ρ , г/см³) от количества проходов по одному следу (n , ед.)

Количество проходов	Средняя плотность по опытному участку, г/см ³
1	1,72
2	2,04
4	2,11
6	2,21
8	2,35
10	2,41
12	2,53
15	2,55
18	2,64

Полученные значения позволили установить зависимость плотности (ρ) от количества проходов автосамосвала (n), которая имеет вид

$$\rho = 1,76 * n^{0,14}.$$

Полученная зависимость характеризуется высоким значением коэффициента корреляции $R = 0,977$.

Зависимость коэффициента уплотнения дорожной одежды от количества проходов автосамосвалов приведена на рис. 1.

Из рис. 2 видно, что опытный участок (1) имеет более устойчивые показатели плотности, чем контрольный (2). Величина коэффициента вариации плотности 0,07 – для опытного и 0,22 – для контрольного участка.

После года эксплуатации измерения плотности проводились повторно. Результаты этих измерений приведены на рис. 3.

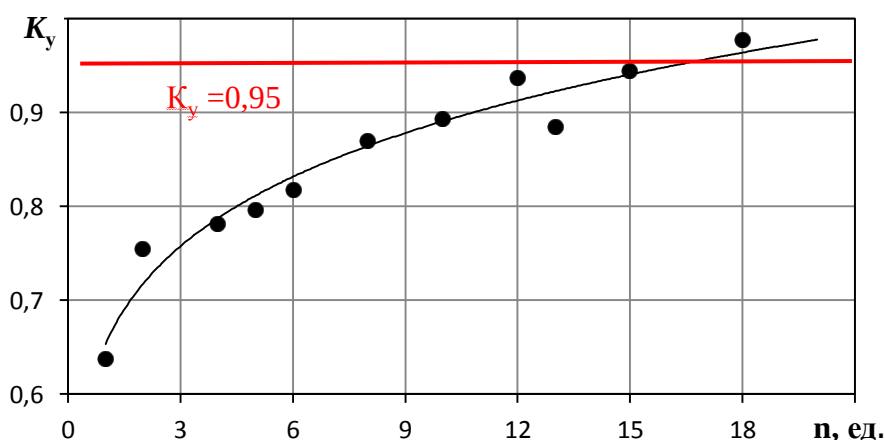


Рис. 1. Зависимость коэффициента уплотнения (K_y) от количества проходов по одному следу (n , ед.)

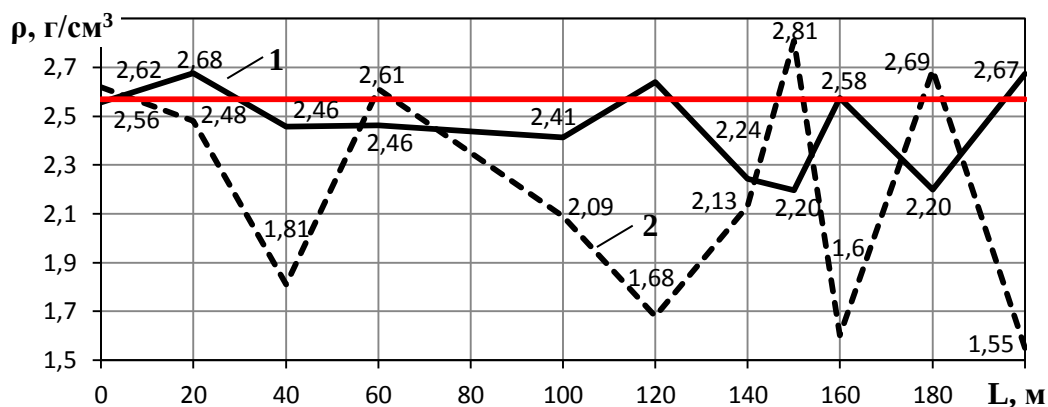


Рис. 2. График вариации плотности опытного (1) и контрольного (2) участков на момент сдачи в эксплуатацию

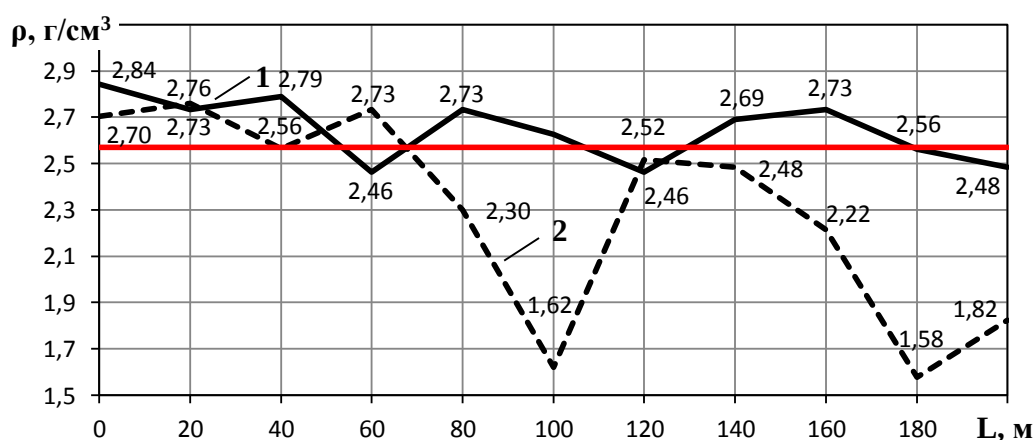


Рис. 3. График вариации плотности опытного (1) и контрольного (2) участков после года эксплуатации

Прочность дорожной одежды оценивалась по величине упругой деформации под задним колесом груженого автомобиля БелАЗ-75131. В каждой точке (месте) производились не менее двух-трех повторных наездов и измерений. Если расхождения между величинами осадок при двух установках автомобиля превышали допустимые значения, производилось еще одно измерение и определялось среднее, исключив резко отклоняющиеся по величине измерения.

Перед испытанием и после производилось контрольное взвешивание автосамосвала и проверка давления воздуха в шинах.

По величине упругой деформации определялся фактический модуль упругости дорожной одежды (E_y , МПа) [2]:

$$E_y = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{p \cdot D(1 - \mu^2)}{l},$$

где μ – коэффициент Пуассона, принимается $\mu=0,3$; p – удельное давление на покрытие, МПа, под действием которого получена упругая де-

формация, равная l , см; D – диаметр отпечатка заднего колеса груженого автомобиля, см.

Удельное давление на покрытие рассчитывалось по формуле [2]

$$p = 1,1P_0,$$

где P_0 – давление воздуха в шинах, МПа.

Диаметр отпечатка заднего колеса груженого автомобиля определялся по формуле [2]

$$D = \sqrt{\frac{40Q}{\pi P_0}},$$

где Q – нагрузка на заднее сдвоенное колесо автомобиля, кг силы.

Зависимость фактического модуля упругости (E_y , МПа) от количества проходов автосамосвалов по одному следу (n , ед.) приведена на рис. 4.

Зависимость фактического модуля упругости (E_y , МПа) от количества проходов автосамосвалов по одному следу (n , ед.) имеет вид

$$E_y = 152,75 * n^{0,2}.$$

Из **рис. 5** видно, что опытный участок (1) имеет более устойчивые показатели модуля упругости, чем контрольный (2). Величина ко-

эффициента вариации модуля упругости 0,11 – для опытного и 0,48 – для контрольного участка.

После года эксплуатации измерения модуля упругости проводились повторно. Результаты этих измерений приведены на **рис. 6**.

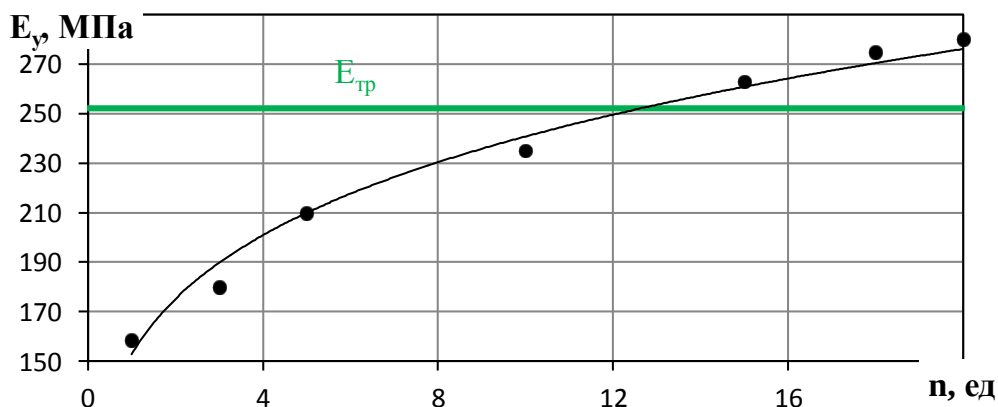


Рис. 4. Зависимость фактического модуля упругости (E_y , МПа) от количества проходов автосамосвалов по одному следу (n , ед)

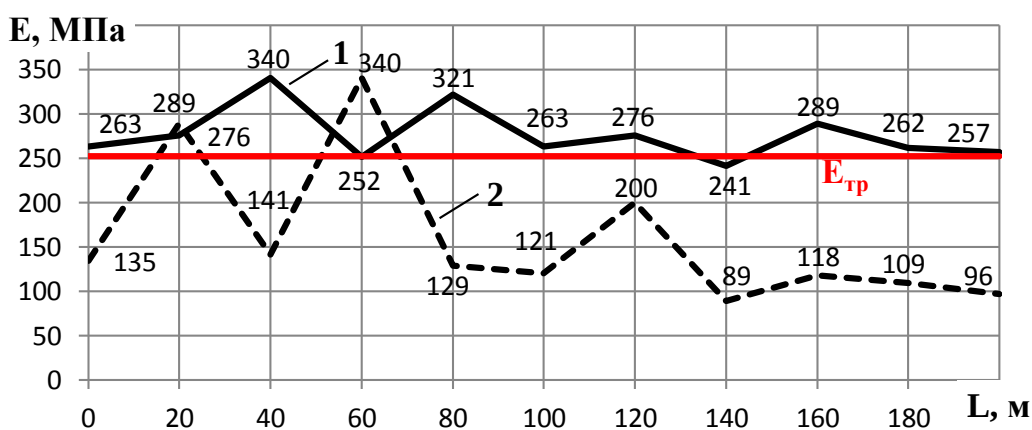


Рис. 5. График вариации модуля упругости опытного (1) и контрольного (2) участков на момент сдачи в эксплуатацию

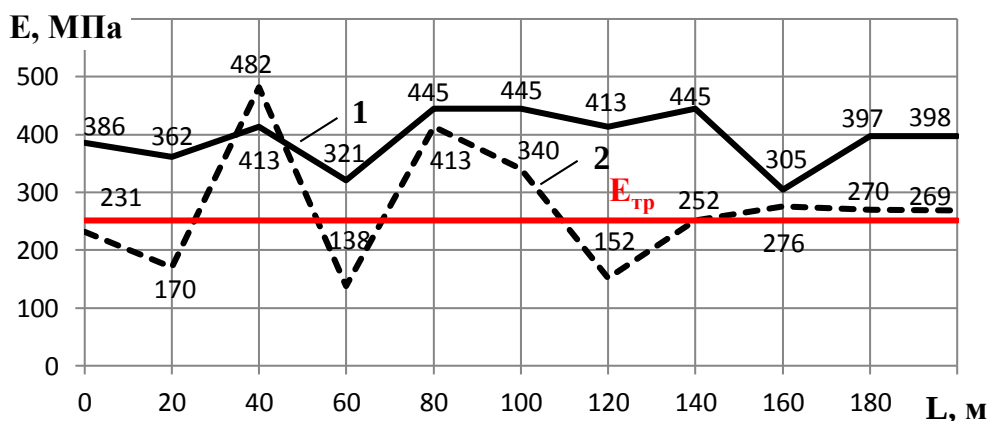


Рис. 6. График вариации модуля упругости опытного (1) и контрольного (2) участков после года в эксплуатации

Сравнение результатов испытаний показывает, что ровность опытного участка значительно выше контрольного и составляет в среднем 1–2 см /10 м против 17–23 см/10 м. То же самое наблюдается и по другим показателям: величина уклона продольного и поперечного профиля опытного участка практически не изменилась, а контрольного осталась на очень низком уровне, 5–78‰ – для поперечного, 78–84‰ – для продольного профиля.

Плотность опытного участка увеличилась в среднем на 10%. Рост однородности уплотнения и прочности дорожной одежды при применении предлагаемой технологии подтверждается уменьшением коэффициента вариации модуля упругости на опытном участке по сравнению с контрольным в 3 раза.

Использование предложенной технологии уплотнения на опытном участке длиной 200 м позволило сократить расход щебня, затрачиваемого на содержание и ремонт дорог, на 4721 т и получить экономический эффект в размере 455,7 тыс. руб.

Заключение

В результате проведения экспериментальных работ на карьере ОАО «Ураласбест» осуществлено строительство с использованием разработанной технологии уплотнения дорожных одежд опытного участка. Выполнена оценка транспортно-эксплуатационных свойств дорожного покрытия и зависимости его характеристик на этом участке от уплотнения карьерными автосамосвалами. Установлены закономерности, позволяющие определять количество проходов автосамосвалов, необходимое для достижения требуемой степени уплотнения слоев дорожных одежд.

Предложенная технология уплотнения и полученные зависимости могут использоваться на горных предприятиях, эксплуатирующих технологические автосамосвалы с целью повышения технико-экономических показателей работы карьерного транспорта.

Список литературы

1. Сидяков В.А., Колчанов А.Г., Стенин Ю.В. Карьерные автомобильные дороги. М.: ООО «Издательский дом Недра», 2011. 144 с.: ил.
2. Инструкция по строительству и содержанию внутрикарьерных автодорог для автосамосвалов грузоподъемностью 110–180 тонн. Харьков, 1985. 93 с.
3. Стенин Ю. В., Лель Ю. И., Колчанов А. Г. Карьерные автодороги – значение и проблемы совершенствования. // Горный информационно-аналитический бюллетень. М.: МГГУ, 2009. № 11. С. 393–400.
4. Томпсон Р.Д., Виссер А.Т. Основы комплексного проектирования карьерных дорог открытых горных разработок // Открытые горные разработки. Осушение и окружающая среда. 1997. № 11. С. 121–128.
5. Стенин Ю. В., Арефьев С. А., Ганиев Р. С. Карьерные автодороги – элемент открытых горных работ // Мир транспорта и технологических машин. 2014. № 1(44). С. 55–62.
6. Стенин Ю. В., Арефьев С. А., Ганиев Р. С. Взаимосвязь карьерных автодорог с технологическими параметрами открытой разработки // Новые огнеупоры. 2014. № 3 (спец. вып.). С. 24–25.
7. Основные параметры оборудования, используемого при строительстве карьерных автодорог / Лель Ю.И., Стенин Ю.В., Сандригайло И.Н., Арефьев С.А. // Изв. вузов. Горный журнал. 2014. № 1. С. 27–32.
8. Совершенствование нормирования расхода топлива карьерными автосамосвалами на основе горизонтальных эквивалентов вертикального перемещения горной / Лель Ю.И., Салахияев Р.Г., Арефьев С.А., Сандригайло И.Н. // Изв. вузов. Горный журнал. 2014. № 2. С. 107–115.
9. Смирнов В.П., Лель Ю.И. Теория карьерного большегрузного автотранспорта. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 355 с.
10. Проблемы совершенствования параметров и транспортно-эксплуатационных качеств карьерных автодорог / Лель Ю. И., Стенин Ю.В., Колчанов А.Г., Арефьев С.А. // Нерудная промышленность. СПб.: Красная линия, 2012. № 2(9). С. 18–25.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

EXPERIMENTAL EVALUATION OF DEPENDENCE OF PAVEMENT CHARACTERISTICS IN QUARRIES ON COMPACTION OF ROADS WITH OPEN PIT DUMP TRUCKS

Arefiev Stepan Aleksandrovich – Teacher, Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia. Phone: +7 (343) 257-22-44. E-mail: arefevsa@yandex.ru.

Abstract. The article contains the technology of pavement layer compaction in quarries, significantly improving performance characteristics of such pavements.

It describes the experience of road construction in a quarry of OJSC Uralasbest and implementation results of the proposed technology.

The author made an evaluation of transport and operational properties of the pavement on an experimental site constructed by compacting the road pavement with open pit dump trucks, which are available at the mining enterprise, without distracting them from their operation related to

transportation of rock mass.

There were found the regularities allowing for determination of the necessary number of dump truck passes to achieve a required degree of pavement compaction.

The proposed technology of compaction and the resulting dependences can be used at mining plants using dump trucks, to improve technical and economic performance of open pit vehicles.

Keywords: Road, quarry, pavement layer compaction, construction of roads, open pit dump trucks.

References

1. Sidiyakov V.A., Kolchanov A.G., Stenin Yu.V. *Kar'ernye avtomobil'nye dorogi* [Quarry auto roads]. Moscow: Izdatel'skij dom Nedra, 2011, 144 p.: illustrated.
2. *Instruktsiya po stroitel'stvu i soderzhaniiu vnutrikar'ernykh avtodorog dlya avtosamosvalov gruzopod"emnost'yu 110-180 tonn*. [Instructions for construction and maintenance of inter-quarry roads for dump trucks with a capacity of 110-180 tons]. Kharkov, 1985, 93 p.
3. Stenin Yu.V., Lel Yu.I., Kolchanov A.G. Quarry roads – their importance and problems of improvement. *Gornyj informatsionno-analiticheskij byulleten'*. [Mining informational and analytical bulletin]. Moscow, 2009, no. 11, pp. 393-400.
4. Thompson R.D., Visser A.T. Fundamentals of integrated design of pit roads in open cast mining. *Otkrytye gornye razrabotki. Osu-shenie i okruzhayushhaya sreda*. [Open mining. Drainage and environment], 1997, no. 11, pp. 121 - 128.
5. Stenin Yu.V., Arefiev S.A., Ganiev R.S. Quarry roads – an element of open cast mining. *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin*. [World of transport and technological machines], 2014, no. 1(44), pp. 55-62.
6. Stenin Yu.V., Arefiev S.A., Ganiev R.S. Relationship of the quarry roads and the process parameters in open cutting. *Novye ognepory*. [New refractories], 2014, no. 3 (special issue), pp. 24-25.
7. Lel Yu.I., Stenin Yu.V., Sandrigaylo I.N., Arefiev S.A. Main parameters of equipment used in the construction of quarry roads. *Izvestiya vuzov. Gornyj zhurnal*. [News of universities. Mining Journal], 2014, no. 1, pp. 27-32.
8. Lel Yu.I., Salakhiev R.G., Arefiev S.A., Sandrigaylo I.N. Improvement of the fuel flow rate setting for dump trucks factoring into horizontal equivalents of vertical movements of rock mass. *Izvestiya vuzov. Gornyj zhurnal*. [News of universities. Mining Journal], 2014, no. 2, pp. 107-115.
9. Smirnov V.P., Lel Yu.I. *Teoriya kar'ernogo bol'shegruznogo avtotransporta*. [Theory of heavy-duty motor transport in quarries]. Yekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2002, 355 p.
10. Lel Yu.I., Stenin Yu.V., Kolchanov A.G., Arefiev S.A. Problems of improving parameters and performance of quarry roads. *Nerudnaya promyshlennost'*. [Non-metal industry]. Saint-Petersburg: Red line, 2012, no. 2(9), pp. 18-25.

Арефьев С.А. Экспериментальная оценка зависимости качества дорожных одежд от уплотнения их карьерными автосамосвалами // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №2. С. 5–11.

Arefiev S.A. Experimental evaluation of dependence of pavement characteristics in quarries on compaction of roads with open pit dump trucks. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 2, pp. 5–11.

ТРАНСПОРТ. ТРАНСПОРТНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 65.40.21.5

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПЕРЕДАЧИ РЕЧИ В СЕТЯХ ОПЕРАТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СВЯЗИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ*

Рахмангулов А.Н.¹, Мирсагдиев О.А.²

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

² Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта, Ташкент, Узбекистан

Аннотация. Представлено описание состава и структуры имитационной модели процессов передачи речи в сетях оперативно-технологической связи на железнодорожном транспорте. Имитационная модель построена с использованием системно-динамического подхода к имитационному моделированию и реализована при помощи программного инструмента AnyLogic. В основу разработанной имитационной модели положена «Е-модель» расчета показателя качества передачи речи («R-фактора»), модифицированная для условий, специфичных для сетей оперативно-технологической связи на железнодорожном транспорте. Предлагаемая имитационная модель позволяет производить оперативную оценку и прогноз качества передачи речи в сетях различного типа, конфигурации, структуры, а также при изменениях внешних условий.

Ключевые слова: качество передачи речи, R-фактор, Е-модель, MOS-оценка, оперативно-технологическая связь, железнодорожный транспорт, имитационное моделирование, системная динамика, AnyLogic.

Введение

Обеспечение безопасности и надежности осуществления перевозочного процесса на железнодорожном транспорте является в настоящий момент важнейшим требованием рынка. Одно из направлений удовлетворения этого требования заключается в совершенствовании систем и средств обеспечения качественных коммуникаций в системах управления перевозками.

Наиболее сильное влияние на эффективность и безопасность перевозочного процесса оказывает качество систем коммуникаций на железнодорожном транспорте. Это, в первую очередь, связано со сложной уровневой структурой коммуникационных сетей на железнодорожном транспорте, состоящей из первичных и вторичных сетей. Первичные сети коммуникации представляют собой совокупность линий связи, сетевых станций и сетевых узлов, образующих сеть групповых трактов и каналов. На основе первичных сетей строятся вторичные сети коммуникации, в состав которых входят: телефонная

сеть общего пользования; сеть передачи данных для автоматизированной системы управления железнодорожным транспортом; сети оперативно-технологической связи (ОТС).

На качество связи в сетях с подобной сложной структурой оказывает влияние множество факторов. В статьях [1, 2] представлен анализ существующих методик оценки качества передачи речи в сетях железнодорожной связи различной конфигурации и состава. Установлено, что наиболее точные результаты обеспечивают методики, основанные на комбинировании расчетов объективного показателя (R-фактор) с субъективной оценкой (MOS) качества передачи речи. Для расчета R-фактора были выбраны рекомендации Международного союза электросвязи (МСЭ) [3,4], основанные на использовании так называемой Е-модели оценки качества передачи речи в сетях связи. Данные рекомендации МСЭ являются универсальными и позволяют учесть все известные факторы, оказывающие влияние на качество передачи речи. Это затрудняет практическое использование существующих методик применительно к условиям железнодорожного транспорта, в частности для оценки качества передачи речи в сетях оперативно-технологической связи. Предлагаемый про-

* Исследование выполнено при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (РФФИ), грант № 14-38-50750.

граммный инструмент, с одной стороны, учитывает факторы, характерные для железнодорожных систем связи, а с другой – позволяет производить оперативную оценку качества передачи речи, давать прогноз качества при изменении параметров сетей и внешних условий, диагностировать причины ухудшения качества связи.

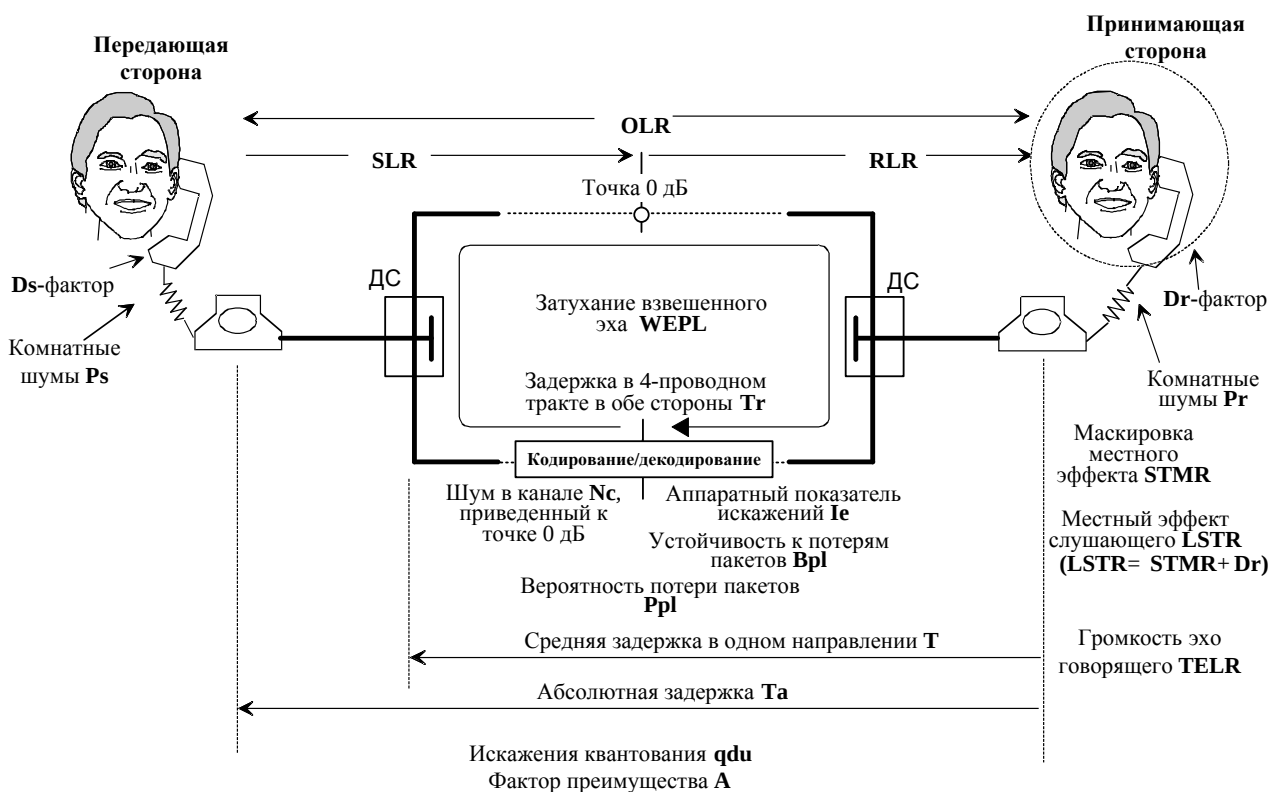
Оценка качества передачи речи на основе Е-модели

Е-модель представляет собой описание эталонного соединения передающей и принимающей сторон, предназначенного для передачи речи (рис. 1) [3, 8]. Е-модель учитывает широкий спектр факторов, влияющих на качество передачи речи, связанных как с применяемыми кодеками и задержками в современных сетях с пакетной передачей данных, так и с «классическими» сбоями в телефонных сетях – различными шумами, «эхом» и тому подобное [8].

В сети связи, описываемой Е-моделью, с помощью дифференциальных систем (ДС) про-

ходит переход с двухпроводных трактов на четырёхпроводные и наоборот, а также осуществляется кодирование (аналого-цифровое преобразование) и декодирование (цифроаналоговое преобразование). Тракты с аналоговыми сигналами показаны на рис. 1 непрерывной линией, а с цифровыми – пунктирной. В середине речевого тракта выделяется стандартная точка 0 дБ. Качество связи оценивается на принимающей стороне, где находится слушающий абонент.

Факторы, представленные в Е-модели, используются при расчете R-фактора, представляющего собой объективный показатель качества передачи речи. Расчет R-фактора выполняется по формулам, представляющим собой аналитические зависимости между факторами [3–6], учитываемыми Е-моделью. Значения R-фактора сопоставимы с результатами субъективной MOS-оценки (Mean Opinion Score) качества связи. MOS-оценка применяется для предварительной оценки качества связи.



SLR (Send Loudness Rating), RLR (Receive Loudness Rating) – уровни громкости соответственно на передачу и прием, учитывающие акустико-электрические характеристики телефонного аппарата и затухание в тракте передачи речи, дБ;

OLR (Overall Loudness Rating) – общий уровень громкости между стандартными точками у рта говорящего и у уха слушающего, дБ.

Рис. 1. Схема Е-модели оценки качества передачи речи в сетях связи

Достоинствами MOS-оценки является простота и оперативность её применения, отсутствие необходимости использования специальной аппаратуры, а соответственно, низкие затраты на оценку качества. Основным недостатком методики, основанной на MOS-оценке, заключается в невозможности выявления причин снижения качества связи и сложности выбора способов повышения качества. Несмотря на отмеченные недостатки, MOS-оценку эффективно использовать для контрольной оценки результатов расчетов R-фактора.

Взаимосвязь между значениями R-фактора и MOS-оценки устанавливается с использованием следующей системы правил:

$$\begin{cases} \text{MOS} = 1 & \text{при } R < 0; \\ \text{MOS} = 1 + 0.0035 * R + R * (R - 60) * (100 - R) * 7 * 10^{-6} & \text{при } 0 < R < 100; \\ \text{MOS} = 4.5 & \text{при } R \geq 100. \end{cases} \quad (1)$$

Наиболее характерные соотношения значений R-фактора и MOS-оценки представлены в табл. 1.

Таблица 1
Результаты сравнения значений R-фактора и MOS-оценки

Значение R-фактора	Значение MOS-оценки	Категория качества передачи речи	Оценка пользователя
90<R<100	4,34–4,50	Самая высокая	Очень хорошая
80<R<90	4,03–4,34	Высокая	Хорошая
70<R<80	3,60–4,03	Средняя	Часть пользователей оценивает качество как неудовлетворительное
60<R<70	3,10–3,60	Низкая	Многие пользователи оценивают качество как неудовлетворительное
50<R<60	2,58–3,10	Неприемлемая	Почти все пользователи оценивают качество как неудовлетворительное

В соответствии с существующими методиками расчет R-фактора производится для сетей связи общего назначения. Однако отмеченные выше особенности сетей передачи речи в ОТС делают актуальной задачу анализа возможности применения данного показателя для количественной оценки качества коммуникаций в системах управления на железнодорожном транспорте.

Кроме того, при определении качества передачи речи в сети ОТС по сравнению с сетью, рассматриваемой в Е-модели, необходимо учитывать следующие особенности.

Оперативное руководство перевозочным процессом на магистральном железнодорожном транспорте осуществляется одним поездным диспетчером в отделениях дорог или одним сменным помощником начальника оперативно-распорядительного отдела службы перевозок дороги. Станции участка, которыми руководит поездной диспетчер или сменный начальник, образуют диспетчерский круг. Голосовая связь в границах диспетчерского круга обеспечивается применением группового канала, в который параллельно подключается множество абонентских устройств.

Групповой канал может иметь несколько ответвлений, образуя древовидную структуру. В цифровой сети речь передается через сумматоры, обеспечивающие групповую структуру канала, а также подключение множества ответвлений.

В сети ОТС разговор между абонентами происходит в полудуплексном режиме, предполагающем управление направлением передачи речи. При переходе с одного направления передачи речи на другое часто используются цифровые обнаружители речи, с помощью которых разговорный тракт переключается в требуемом направлении передачи.

Наконец, в сети ОТС кроме режима передачи речи от точки к точке (разговор между диспетчером и исполнителем) регулярно используется режим конференц-связи, когда один абонент круга говорит, а все остальные абоненты этого круга его слушают.

Вследствие указанных особенностей ряд параметров предлагается рассчитывать иначе, чем это предполагает Е-модель. К таким параметрам относятся: уровень громкости эха у говорящего – TELR, затухание взвешенного эха – WEPL и суммарная мощность всех шумов в канале в точке 0 дБ – Nс.

Использование системно-динамического подхода для моделирования качества передачи речи в сетях связи

Системно-динамический подход к построению имитационных моделей представляет собой описание взаимосвязей между множеством параметров (переменных) исследуемой системы в динамике. С математической точки зрения си-

стемно-динамическая модель представляет собой систему дифференциальных уравнений. Динамика исследуемой системы, то есть изменение значений переменных модели, описывается при помощи потоков, соединяющих накопители (переменные). Два накопителя, соединенные потоком определенной интенсивности, моделируют уменьшение значения переменной, соответствующей запасу в накопителе-источнике потока, и увеличение значения переменной, соответствующей запасу в накопителе-получателе потока. Интенсивности потоков задаются переменными модели, значения которых могут изменяться в процессе моделирования [6, 7].

Описанный подход эффективен при моделировании процесса передачи речи в каналах связи, поскольку позволяет учесть сложные взаимосвязи множества факторов, влияющих на качества связи, а также динамику этих факторов.

В качестве инструмента построения системно-динамической модели сетей передачи данных выбрана программа AnyLogic, обладающая развитым графическим интерфейсом, широкими возможностями проведения разнообразных экспериментов с моделями и позволяющая эффективно строить и исследовать сложные модели в интерактивном режиме.

На текущем этапе построения имитационной модели оценки качества передачи речи в сетях оперативно-технологической связи на железнодорожном транспорте была разработана и верифицирована статическая модель расчета значений R-фактора. Такая модель включает в себя постоянные, значения которых специфичны для сетей ОТС, а также переменные, значения которых рассчитываются по аналитическим зависимостям, представленным в рекомендациях МСЭ [3–5]. Например, расчет величины эффективного

аппаратного показателя I_{e-eff} производится по следующей формуле:

$$I_{e-eff} = I_e + (95 - I_e) \frac{P_{pl}}{\frac{P_{pl}}{BurstR} + B_{pl}}, \quad (2)$$

где I_e – величина потерь пакетов; B_{pl} – величина устойчивости к потерям пакетов; P_{pl} – вероятность потери пакетов; $BurstR$ – параметр всплесков средней длины наблюдаемых пульсаций в последовательности поступающих пакетов к средней длине пульсаций.

В имитационной модели, построенной в системе AnyLogic, зависимость (2) представляет собой изображение связей между переменной и I_{e-eff} и постоянными (в данном простейшем примере) I_e , B_{pl} , P_{pl} и $BurstR$ (рис. 2).

Общий вид системно-динамической модели, имитирующей изменения значения R-фактора, представлен на рис. 3. Разработанная модель использовалась для исследования влияния на качество передачи речи в сетях ОТС различных факторов, характерных для сетей железнодорожной связи. Дальнейшее развитие модели предусматривает введение в неё накопителей и потоков, что позволит моделировать динамику внешних факторов, а также выявлять критические для качества связи сочетания этих факторов.

Значения переменных имитационной модели, при которых проводились её исследования, представлены в табл. 2. Основной задачей исследования было определение зависимостей значений R-фактора от условий, характерных для сетей ОТС на железнодорожном транспорте, и отличных от идеальных условий, представленных в рекомендации МСЭ – G.107 [3].

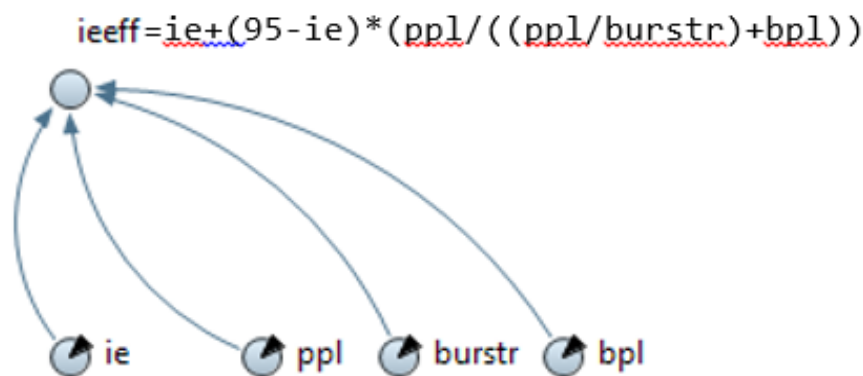


Рис. 2. Пример моделирования связей между переменной и постоянными в системно-динамической модели оценки качества передачи речи

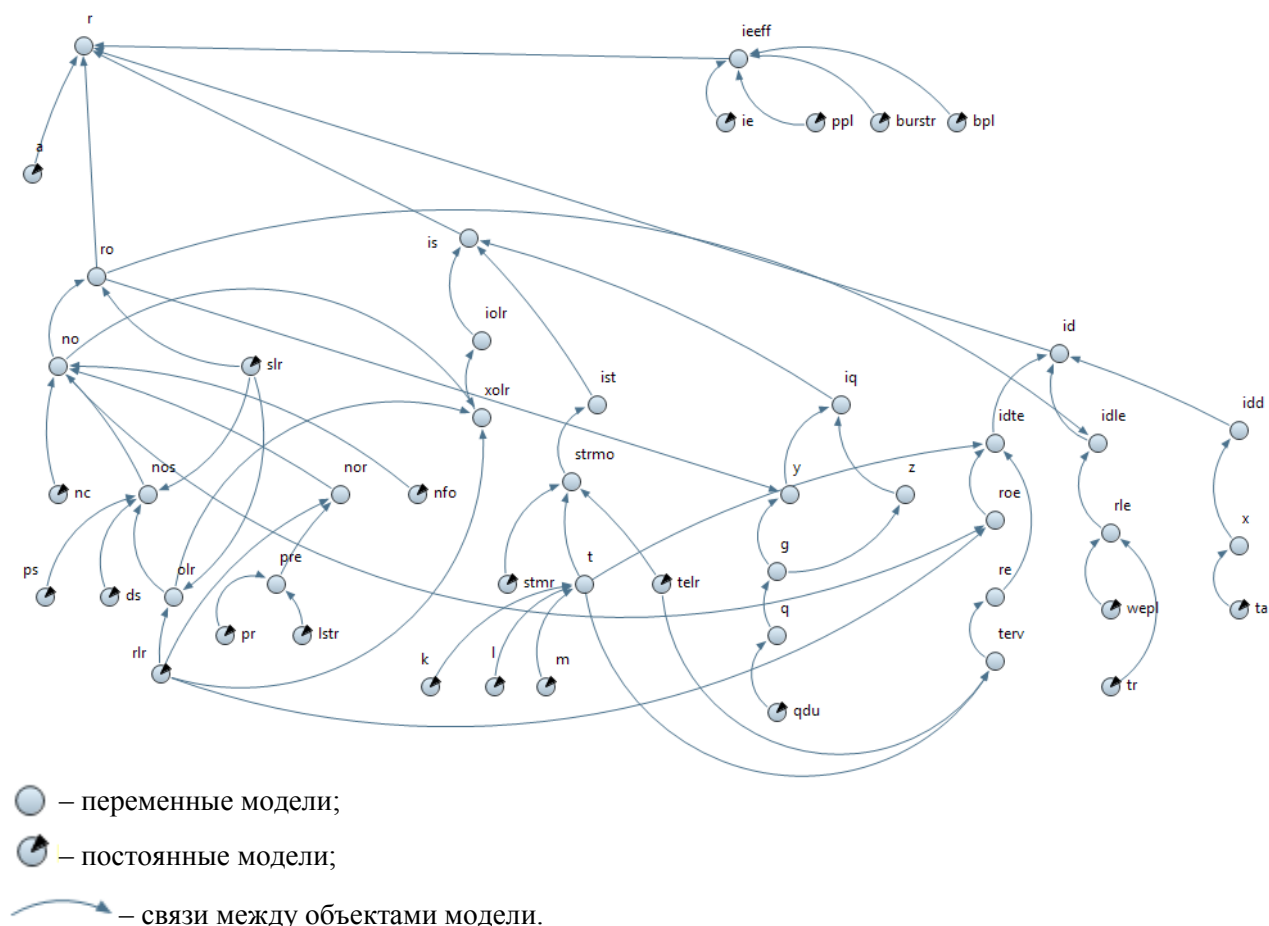


Рис. 3. Структура имитационной модели исследования R-фактора

Таблица 2

Значения переменных имитационной модели оценки качества передачи речи в сетях ОТС на железнодорожном транспорте

Параметр	Обозначение	Единица измерения	Значения по рекомендациям МСЭ	Предел изменения по рекомендациям МСЭ	Значения для железнодорожного транспорта (кодек G.711)		
					Цифроаналоговая сеть	Цифровая сеть	Пакетная сеть
Уровень громкости на передачу	SLR	дБ	+8	0...+18	+7; +4.45	+7	+7
Уровень громкости на приём	RLR	дБ	+2	-5...+14	+3 + 0.45	+3	+3
Уровень громкости «эхо» у говорящего	TELRL	дБ	+65	-5...+65	+66, a _n =56дБ	+85, a _n =75дБ с упр. речью; +50 a _n =40 дБ, без упр. речью	+85, a _n =75дБ с упр. речью; +50 a _n =40 дБ, без упр. речью
Затухание взвешенного эха	WEPL	дБ	+110	-5...+110	+131	+150 с упр. речью; +80 без упр. речью	+150 с упр. речью; +80 без упр. речью
Аппаратный показатель искажений	le	–	0	0...40	0	0	0 для кодера G.711
Вероятность потери пакетов	Ppl	%	0	0...20	0	0	1% – 5%
Шум в канале в точке 0 дБ	Nc	дБ	-70	-80...-40	~	~	-70 с VAD; -65 без VAD

В соответствии с рекомендацией G.107 [3, 5] в модели были приняты следующие параметры, не зависящие от условий железнодорожного транспорта: маскировка местного эффекта – STMR; местный эффект у слушающего – LSTR; D-фактор для телефонного аппарата при передаче – Ds; D-фактор для телефонного аппарата при приеме – Dr; количество единиц искажения квантования – qdu; устойчивость к потерям пакетов – Bpl; параметр пульсаций – BurstR; пороговый шум на стороне приема – Nfor; комнатный шум на передающей стороне – Ps; комнатный шум на принимающей стороне – Pr; фактор преимущества – A.

Для условий передачи речи в сетях ОТС на железнодорожном транспорте в модели были использованы следующие значения (пределы изменения) переменных:

SLR – уровень громкости на передачу. Для цифроаналоговой сети принимается равным +7 дБ – в прямом и +4.45 дБ – в обратном направлении. Для цифровой и пакетной сети принято +7 дБ как в прямом, так и в обратном направлениях;

RLR – уровень громкости на прием. Для цифроаналоговой сети принимается равным +3 дБ – в прямом и +0.45 дБ – в обратном направлении. Для цифровой и пакетной сети принято +3 дБ как в прямом, так и в обратном направлениях;

TELR – уровень громкости «эхо» у говорящего. Для цифроаналоговых сетей принят +66 дБ с учетом добавления переходного затухания ($a_p=56$ дБ). Для цифровых и пакетных сетей TELR = +85 дБ, если передача осуществляется с управлением речью и $a_n = 75$ дБ. Если в этих же сетях передача осуществляется без управления речью, то переходное затухание $a_n=40$ дБ, а TELR = +50 дБ. В режиме конференц-связи значение TELR зависит от количества станций, подключенных к групповому каналу;

WEPL – затухание взвешенного эха. Для цифроаналоговых сетей принято значение +131 дБ, для цифровых и пакетных сетей, если передача осуществляется с управлением речью, WEPL = +150 дБ, без управления речью WEPL = +80 дБ. В режиме конференц-связи показатель TELR зависит от количества станций, подключенных к групповому каналу;

Ie – аппаратный показатель искажений. Для цифроаналоговых и цифровых сетей принят равным нулю, а для пакетных сетей зависит от используемого кодека – для кодека G.711 Ie = 0;

Ppl – вероятность потери пакетов. Для цифроаналоговых и цифровых сетей принята равной нулю, а для пакетных сетей – от 1 до 5%;

Nc – шум в канале в точке 0 дБ. Для цифроаналоговых и цифровых сетей рассчитывается с учетом количеством ответвлений в диспетчерском круге, а для пакетных сетей Nc = –70 дБ, при использовании VAD (Voice activity detector – детектор речевой активности) и Nc = –65 дБ без VAD.

Для обеспечения необходимого уровня безопасности и эффективности перевозок на железнодорожном транспорте сети связи должны передавать речь с минимальным временем задержки, при сохранении значений R-фактора не хуже 70 и MOS-оценки не менее 3,6 (см. **табл. 1**). Увеличение времени задержки в передаче речи приводит к увеличению затрат времени на принятие и реализацию решений по управлению перевозочным процессом, а также снижает уровень безопасности перевозок (повышает риск сбоев в работе и аварий). Увеличение времени задержки передачи связано, главным образом, с потерей и задержками в передаче пакетов данных.

Для установления зависимостей между временем задержки и значением R-фактора с использованием разработанной имитационной модели были проведены эксперименты при различных условиях (**табл. 2**), с учетом использования в сети ОТС разных кодеков, а также при использовании в сети адаптивного и неадаптивного сумматора с VAD и без VAD. Результаты экспериментов представлены на **рис. 4–6**.

Полученные зависимости, а также разработанная имитационная модель могут быть использованы для экспресс-оценки качества передачи речи в сетях ОТС на железнодорожном транспорте, при отсутствии возможности проведения замеров реальных факторов. Использованные в модели параметры ОТС специфичны для сетей передачи речи на железнодорожном транспорте, что позволяет исключить трудоемкие расчеты значений R-фактора для конкретных условий.

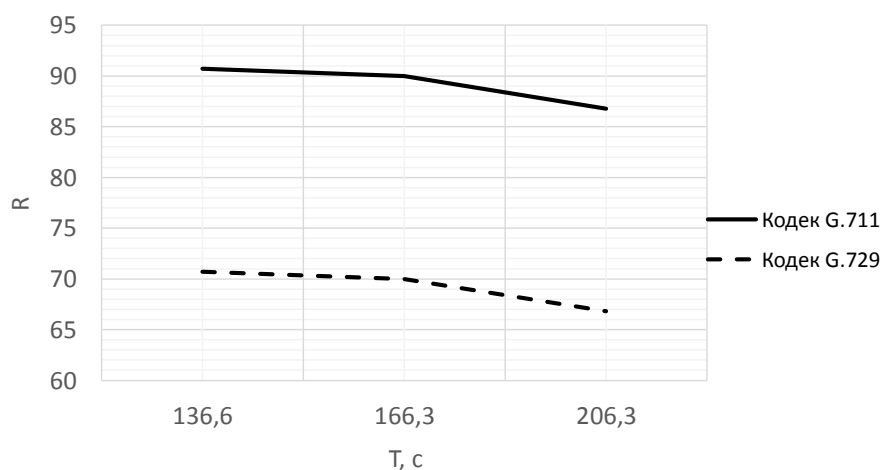


Рис. 4. Изменение R-фактора от времени задержки передачи речи, при использовании адаптивного сумматора с VAD

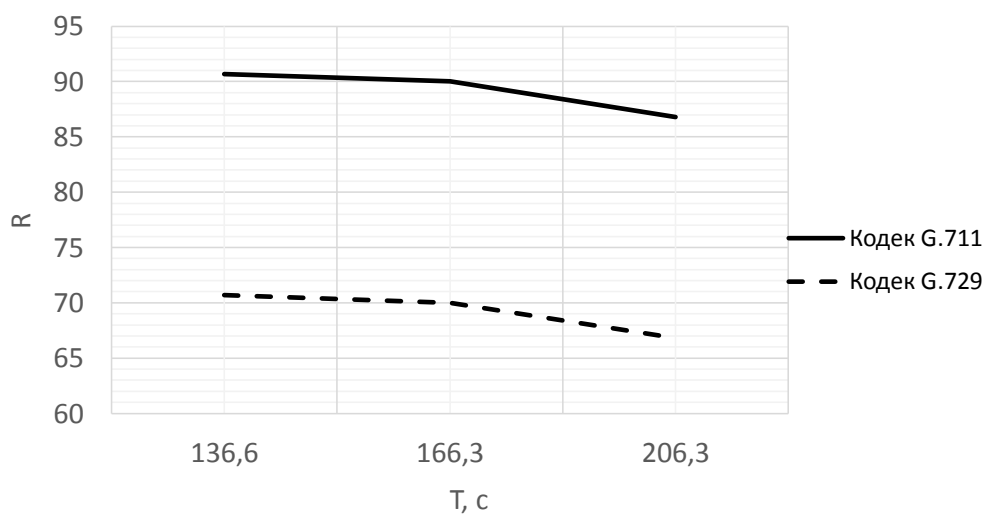


Рис. 5. Изменение R-фактора от времени задержки передачи речи, при использовании неадаптивного сумматора с VAD

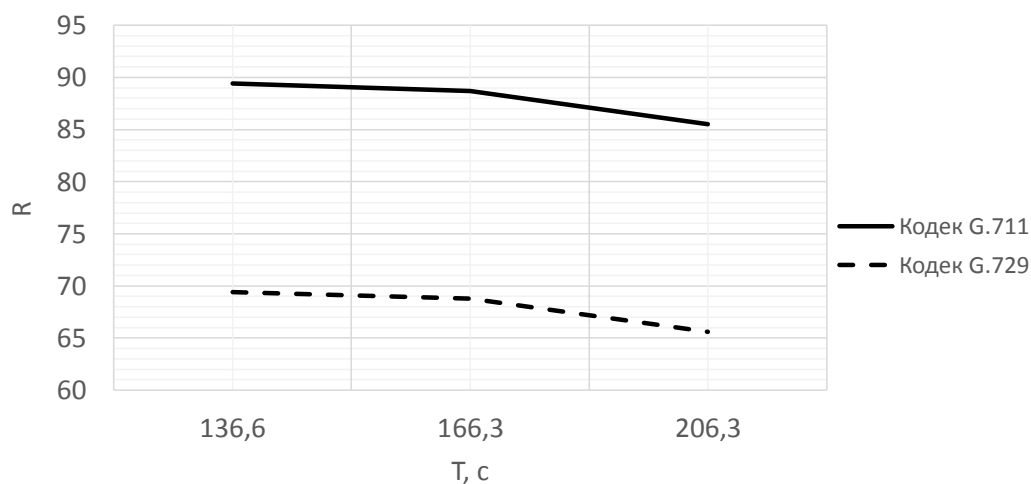


Рис. 6. Изменение R-фактора от времени задержки передачи речи, при использовании адаптивного сумматора без VAD

Заключение

Разработанная системно-динамическая имитационная модель оценки качества передачи речи в сетях связи позволяет наглядно представить взаимосвязь параметров E-модели, описывающей факторы, влияющие на качество связи, а также рассчитывать значения R-фактора – показателя качества передачи речи для различных условий. Применение разработанной имитационной модели для условий, специфичных для железнодорожных сетей связи, показало эффективность использования показателя «R-фактор» для таких сетей. Были получены зависимости между величиной R-фактора и задержками времени в передаче речи в сетях ОТС, оказывающими влияние на время принятия диспетчерами решений по управлению перевозочным процессом.

Развитие построенной имитационной модели предполагается вести в двух взаимодополняющих направлениях. Первое направление связано с введением в модель объектов (накопителей и каналов), позволяющих моделировать динамику параметров внешней среды и процессов, происходящих в сетях связи, на качество передачи речи, а также учитывать взаимовлияния, в частности обратные связи между этими параметрами. Второе направление предполагает комбинирование построенной системно-динамической модели сетей связи на железнодорожном транспорте с дискретно-событийными имитационными моделями [10] железнодорожных станций [9], входящих в диспетчерский круг. Такое комбинирование моделей, поддерживаемое программой AnyLogic, позволит оценить влияние качества передачи речи в сетях ОТС на показатели пере-

возочного процесса на железнодорожном транспорте, оценить риск возникновения аварий и сбоев в работе.

Список литературы

1. Лебединский А.К. Оценка качества передачи речи в сетях с коммутацией каналов и пакетов // Автоматика, связь, информатика. 2011. №11. С. 6–9.
2. Лебединский А. К., Мирсагдиев О.А. Оценка качества передачи речи в сетях ОТС // Автоматика, связь, информатика. 2012. №10. С. 2–5.
3. Recommendation ITU-T G.107 (2009), The E-model: a computational model for use in transmission planning [Электронный ресурс]. URL: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.107-201402-P/en> (дата обращения: 08.12.2014).
4. Recommendation ITU-T G.108 (1999), Application of the E-model: A planning guide [Электронный ресурс]. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.108-199909-I/en> (дата обращения: 08.11.2014).
5. Recommendation ITU-T G.107 (1998), The E-model: a computational model for use in transmission planning [Электронный ресурс]. URL: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.107-199812-S/en> (дата обращения: 08.12.2014).
6. Справочная система AnyLogic [Электронный ресурс]. URL: <http://www.anylogic.ru/anylogic/help/>
7. Borshchev A. The Big Book of Simulation Modeling: Multimethod Modeling with AnyLogic 6. Chicago: AnyLogic North America, 2013. 614 p.
8. The E-model [Электронный ресурс]. URL: <http://www.itu.int/ITU-T/studygroups/com12/emodelv1/tut.htm>
9. Рахмангулов А.Н., Мишкuroв П.Н. Особенности построения имитационной модели технологии работы железнодорожной станции в системе AnyLogic // Сборник научных трудов SWorld. 2012. Т. 2. №4. С. 7–13.
10. Муравьев Д.С., Мишкuroв П.Н., Рахмангулов А.Н. Использование имитационного моделирования для оценки перерабатывающей способности морских портов и обоснования необходимости сооружения «сухого» порта // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2013. №4(4). С. 66–72.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

A SIMULATION MODEL OF QUALITY ASSESSMENT OF VOICE TRANSMISSION IN OPERATIONAL AND TECHNOLOGICAL NETWORKS IN RAILWAY TRANSPORT

Rakhmangulov Alexander Nelievich – D.Sc (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Tel.: +7(3519) 29-85-16. E-mail: ran@logintra.ru.

Mirsagdiev Orifzhon Alimovich – Lecturer of the Electrical Communication and Radio Department, Tashkent Institute of Railway Transport Engineers, Tashkent, Uzbekistan. E-mail: oamirsagdiev@yandex.ru.

Abstract. This article describes a composition and structure of a simulation model of voice transmission in operational and technological networks in railway transport. The simulation model was built using a system dynamics approach to simulation modeling and implemented with simulation programming software AnyLogic. The basis of the developed simulation model is “E- model” of the voice transmission quality calculation (“R-factor”), modified for the conditions specific to operational and technological communication networks in railway transport. The proposed simulation model allows

for a rapid assessment and prediction of the speech quality in networks of different types, configurations, structures, as well as in case of changes in external conditions.

Keywords: Voice transmission quality, R-factor, E-model, MOS-assessment, operational and technological networks, railway transport, simulation modeling, system dynamics, AnyLogic.

References

1. Lebedinskiy A.K. Otsenka kachestva peredachi rechi v setyakh s kommutatsiei kanalov i paketov. [Assessment of the voice trans-

- mission quality in networks with channel and packet switching]. *Avtomatika, svyaz, informatika*. [Automation, communication, computer science], 2011, no.11, pp.6-9.
2. Lebedinskiy A.K., Mirsagdiev O.A. Otsenka kachestva peredachi rechi v setyakh OTS. [Assessment of the voice transmission quality in operational and technological networks]. *Avtomatika, svyaz, informatika*. [Automation, communication, computer science], 2012, no.10, pp.2-5.
3. Recommendation ITU-T G.107 (2009), The E-model: a computational model for use in transmission planning [Electronic resource]. URL: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.107-201402-P/en> (Accessed 8 December 2014).
4. Recommendation ITU-T G.108 (1999), Application of the E-model: A planning guide [Electronic resource]. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.108-199909-I/en> (Accessed 08 November 2014).
5. Recommendation ITU-T G.107 (1998), The E-model: a computational model for use in transmission planning [Electronic resource]. URL: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.107-199812-S/en> (Accessed 8 December 2014).
6. A help system of AnyLogic [Electronic resource]. URL: <http://www.anylogic.ru/anylogic/help/>.
7. Borshchev A. The Big Book of Simulation Modeling: Multimethod Modeling with Anylogic 6. Chicago: AnyLogic North America, 2013, 614 p.
8. The E-model [Electronic resource]. URL: <http://www.itu.int/ITU-T/studygroups/com12/emodelv1/tut.htm>.
9. Rakhmangulov A.N., Mishkurov P.N. Osobennosti postroeniya imitatsionnoy modeli tekhnologii raboty zheleznodorozhnoy stantsii v sisteme AnyLogic. [Features of a simulation model construction of the operation of railway stations in AnyLogic]. *Sbornik nauchnykh trudov Sworld*. [Collection of scientific papers SWorld], 2012, vol. 2, no. 4, pp. 7-13.
10. Muraviev D.S., Mishkurov P.N., Rakhmangulov A.N. Ispolzovanie imitatsionnogo modelirovaniya dlya otsenki pererabatyvayushchey sposobnosti morskikh portov i obosnovaniya neobkhodimosti sooruzheniya «sukhogo» porta. [Simulation modeling used to assess the sea port processing capacity and justify the necessity of dry port construction]. *Sovremennye problemy transportnogo kompleksa Rossii*. [Modern problems in the Russian transport complex], 2013, no. 4 (4), pp. 66-72.

Ракхмангулов А.Н., Мирсагдиев О.А. Имитационная модель оценки качества передачи речи в сетях оперативно-технологической связи на железнодорожном транспорте // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №2. С. 12–20.

Rakhmangulov A.N., Mirsagdiev O.A. A simulation model of quality assessment of voice transmission in operational and technological networks in railway transport. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 2, pp. 12–20.

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

УДК 669.162.22-52

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСХОДА ГОРЯЧЕГО ДУТЬЯ НА ОТДЕЛЬНО ВЗЯТУЮ ФУРМУ В ГОРНЕ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Дружков В.Г., Ширшов М.Ю., Прохоров И.Е.

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

Аннотация. Рассмотрена значимость контроля и наличие достоверной информации о расходе дутья по фурмам доменной печи. Обобщены различные методы определения расхода горячего дутья на отдельно взятую фурму, применявшиеся в доменном производстве с 30-х годов XX века, а также представлена их классификация. Значительный практический интерес в настоящее время и в будущем представляют расходомеры без ввода измеряющего устройства в поток дутья. Предлагается использовать такие измерительные устройства в системах автоматического распределения дутья (САРД) по фурмам нового поколения.

Ключевые слова: неравномерность распределения дутья по фурмам, дутьевой режим, расход горячего дутья по фурмам, расходомеры, классификация измерительных устройств, система автоматического распределения дутья по фурмам, отбор статического давления на диффузоре, кольцевой воздухопровод, калориметр, САРД нового поколения.

Введение

Неравномерность распределения дутья по фурмам доменной печи вызвана следующими причинами: односторонний подвод горячего дутья к кольцевому воздухопроводу, подвод дутья к кольцевому воздухопроводу в двух местах, разная газопроницаемость материалов в надфурменных зонах, геометрия фурменных рукавов и т.д. [1–3].

Для эффективного управления доменным процессом необходимо установить параметры дутьевого режима. Расход дутья – основной показатель дутьевого режима, который определяет нормальную работу печи и служит для управления ходом печи «снизу». Отсюда следует реальная значимость контроля расхода дутья по фурмам [4]. Наличие достоверной информации о расходе дутья, подаваемого через каждую фурму доменной печи, позволяет организовать оперативный технологический контроль за равномерностью его поступления по окружности печи и осуществлять управление технологическим состоянием доменной плавки за счет выравнивания или установки заданного соотношения дутье–топливная добавка [4, 5].

Основная часть

К расходомерам предъявляются требования, удовлетворить которые совместно достаточно сложно и не всегда возможно: высокая точность измерения, надежность, быстродействие, независимость результатов измерения от изменения среды.

Чаще всего в промышленности расход жидкостей и газов замеряется с помощью расходомеров переменного перепада давления, основанных на соотношении расхода и перепада давления. В зависимости от принципа действия расходомеры подразделяются на следующие категории: с сужающими устройствами (стандартные диафрагмы, сопло Лаваля, труба Вентури), центробежные (колесо, кольцевой участок трубы), с напорными устройствами (трубка Пито и отбор статического давления, преобразователь с дифференциальной трубкой Пито, напорное поворотное крыло с двумя отверстиями)[6]. На **рис. 1** представлена классификация измерительных устройств.

На доменных печах измерительные устройства можно классифицировать следующим образом:

– **устанавливаемые внутри фурменных приборов.** К ним относятся шайбы, сопла, напорные трубки Пито и др [1, 4, 7, 8]. При эксплуатации этих расходомеров выявились следующие недостатки: увеличение сопротивления прохождению дутья в фурменном приборе, при

недостаточной мощности воздуходувок это приводило к снижению производительности доменной печи и эффективности внедрения систем автоматического распределения дутья по фурмам (САРД); выход из строя расходомеров вследствие резкого повышения температуры окружающей среды при горении отсасываемых из печи горновых газов во время остановок доменной печи со взятием ее «на тягу»; изменение сечения сужающих устройств из-за абразивного действия частиц пыли и др.;

– без ввода измеряющего устройства в поток дутья. Работы в этом направлении начались после того, как группа исследователей под руководством М.А. Стефановича предложила определять расход дутья по фурмам, используя значение перепада давлений его в диффузоре фурменного прибора как местном сопротивлении [9, 10]. Такой метод измерения и развитие его представляет значительный практический интерес в настоящее время и в будущем.

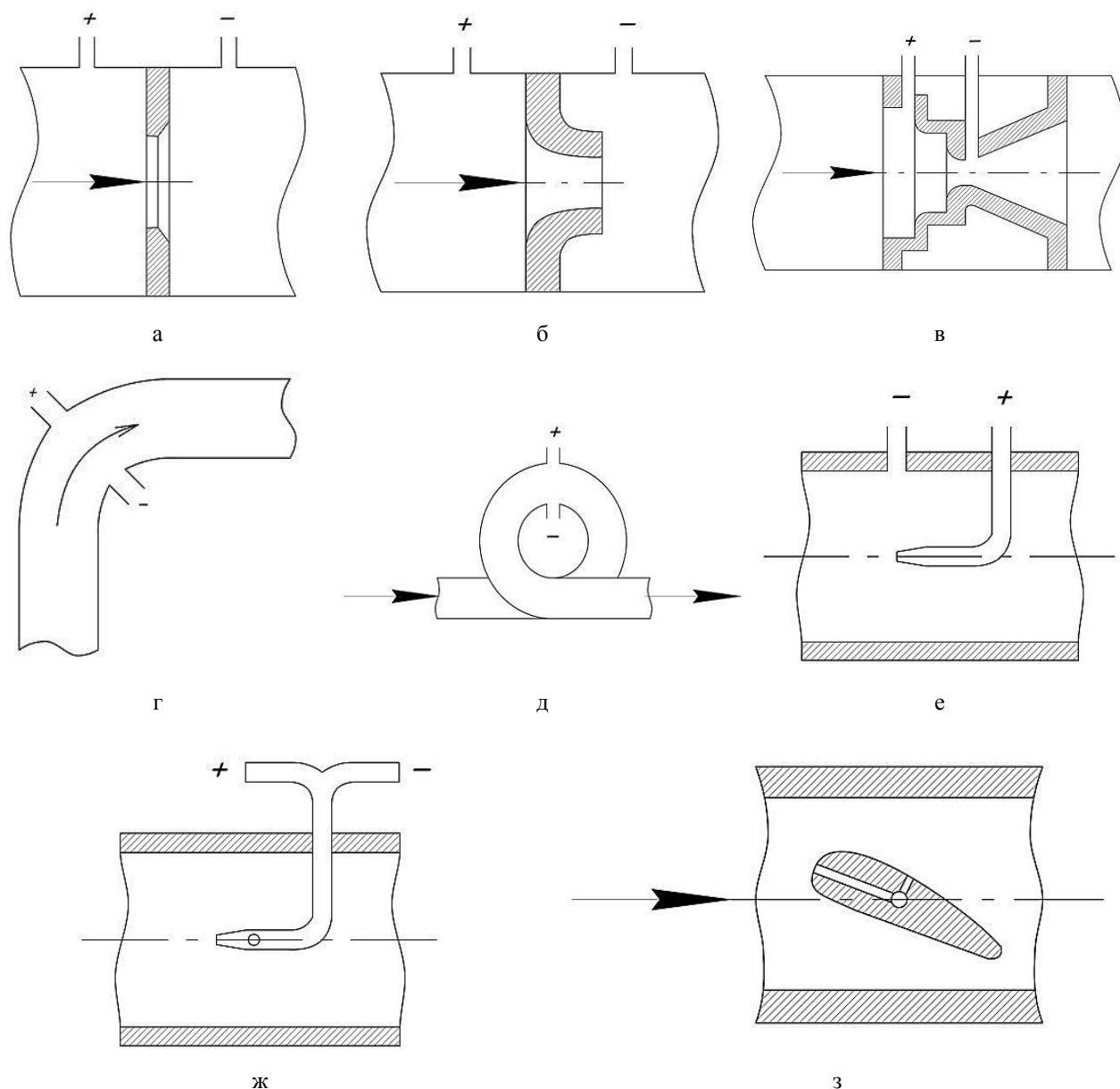


Рис. 1. Расходомеры переменного перепада давления:
 а – стандартная диафрагма; б – сопло Лаваля; в – труба Вентури; г – колено;
 д – кольцевой участок трубы; е – трубка Пито и отбор статического давления;
 ж – преобразователь с дифференциальной трубкой Пито;
 з – напорное поворотное крыло с двумя отверстиями

Рассмотрим более подробно использование измерительных устройств в различные периоды времени.

В 1930-х годах в СССР применялся ряд общепринятых методов измерения количества горячего дутья. Уже тогда считалось, что более совершенным способом является непосредственное измерение количества дутья, поступающего в доменную печь, что позволит быстро устранять недостатки в ходе печи.

Так, З.И. Некрасов в 1935 году на печи № 2 Днепропетровского завода металлургического оборудования применил разрезное сопло, в которое было вставлена стандартная диафрагма. Обслуживание такой фурмы практически было неудобно. Особенно затруднения возникали при смене фурм, когда приходилось отключать от шайбы напорные трубки. В сопла очень часто попадал шлак, который сильно искажал показания прибора [11].

Установка диафрагмы требует определенных условий, особенно наличия прямых участков воздухопровода до и после диафрагмы. На всех печах завода Rochling в 1935 году было использовано то обстоятельство, что кольцевой воздухопровод был выше оси фурм почти на 6 м. Вследствие этого между кольцевым воздухопроводом и фурменным рукавом имелся вертикальный прямолинейный участок длиной 3960 мм, в который и была установлена диафрагма [11].

В 1937 году появилось предложение о применении в качестве измерительного устройства сопла Вентури, рассчитанного для конкретных условий доменной печи № 3 Днепровского металлургического комбината (рис. 2) [11].

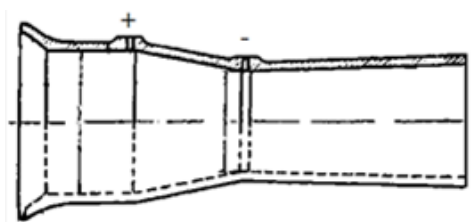


Рис. 2. Сопло Вентури

В 1938 году А.Н. Похвиснев, С.К. Трекало, Г.А. Воловик провели ряд исследований на доменной печи № 1 Запорожстали, целью которых было выяснить: количество дутья, поступающего на каждую фурму, а также возможность применения простейших в практическом обслуживании измерительных устройств. В качестве измерительного устройства была выбрана диафрагма, которая устанавливалась между фланцем подвижного колена и фланцем с шаровой

заточкой, центрирующим сопло. Температура дутья при этом достигала 800°C [12].

В 1946 году на доменной печи №4 Кузнецкого металлургического комбината применялся метод измерения количества воздуха, поступающего через каждую фурму с использованием напорной трубки, изображенной на рис. 3. Систематическое измерение перепадов давлений по фурмам позволило определить количество воздуха, поступающего через каждый фурменный прибор [13].

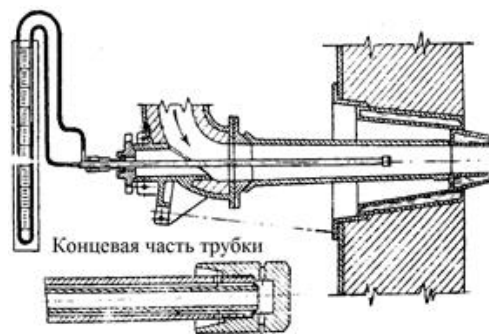


Рис. 3. Трубка для измерения динамического напора в фурме [13]

В ноябре 1961 года на доменной печи Кузнецкого металлургического комбината была внедрена система автоматического регулирования распределения дутья по фурмам (рис. 4). В качестве органов контроля применены неохлаждаемые укороченные измерительные сопла, выполненные из жаропрочной стали. Они размещались на границе диффузора и вертикального патрубка. Такие измерительные устройства надежно работали при температуре горячего дутья до 1050°C [15,16].

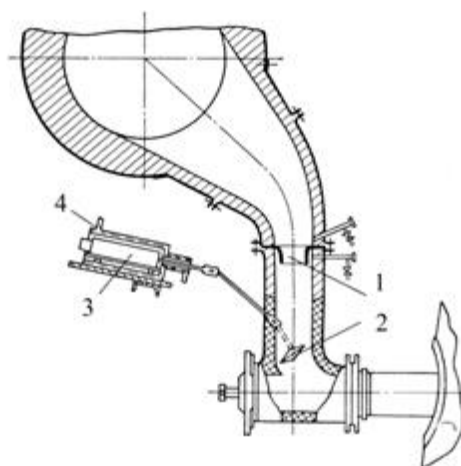


Рис. 4. Система автоматического распределения дутья по фурмам [15]: 1 – измерительное сопло; 2 – мотыльковый клапан; 3 – привод; 4 – водоохлаждаемый кожух

Аналогичная конструкция САРД была введена на доменной печи Макеевского металлургического завода в декабре 1963 года [15, 17, 18].

В 1965 году проведены испытания пневмометров крыловидного профиля на доменной печи № 1 Новолипецкого металлургического завода (см. **рис. 1, з**) [19].

В 1969 году на Магнитогорском металлургическом комбинате исследованы измерительные устройства с целью определения их характеристик и возможности устойчивой работы в окислительной атмосфере. Применялись измерительные устройства – укороченные сопла Вентури, нестандартные сопла с профилем кривизны в четверть круга (сопло «четверть круга») и неподвижного фурменного сопла. Исследование позволило правильно выбрать места отбора для измерения перепадов давлений, обеспечивающих максимальную величину перепадов при минимальных гидравлических потерях на измерительном органе [9, 10]. С этой точки зрения наилучшие результаты дал способ измерения перепада давлений на (диффузоре) неподвижном колене фурменного прибора. Данный метод измерения расхода дутья представлен на **рис. 5**.

Расход дутья на n -фурме рассчитывался по формуле [9, 10]

$$Q_n = k \sqrt{\Delta h_n}, \quad (1)$$

где Δh_n – перепад на фурменном колене (диффузоре) n -й фурмы; Q_n – расход дутья, м³/мин на n -й фурме; k – коэффициент, определяемый по формуле

$$k = \frac{Q_D}{\sum_{i=1}^n \sqrt{\Delta h_i}}, \quad (2)$$

где Q_D – суммарный расход дутья на печь, м³/мин.

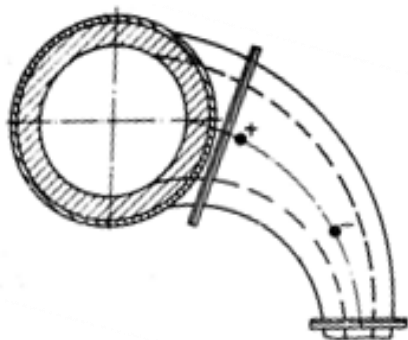


Рис. 5. Места отбора статического давления на диффузоре фурменного прибора [9, 10]

Такой метод перспективен. Есть уже наработки совершенствования его: Δp на фурменном приборе замеряется в доменном цехе ОАО «ММК» по формуле

$$\Delta p_i = p_{г.д} - p_i,$$

где Δp_i – перепад давления на n -й фурме;

$p_{г.д}$ – давление горячего дутья около места врезки прямого воздухопровода горячего дутья в кольцевой; p_i – давление горячего дутья на n -й фурме.

Это позволило уменьшить количество мест отбора импульсов.

В 1989 году на доменной печи № 1 металлургического комбината «Криворожсталь» проводились экспериментальные исследования с целью оценки окружного газораспределения. Печь была снабжена устройствами для измерения перепадов давления между фурменными рукавами и определенными (четырьмя) точками кольцевого воздухопровода, изображенными на **рис. 6**, которые соединялись с дифманометрами [20]. Благодаря такому отбору статического давления повысилась точность Δp_i .

Опыт технологов-доменщиков Западно-Сибирского и Новолипецкого металлургических комбинатов (ЗСМК и НЛМК) показал повышение точности замеров расходов дутья на каждую фурму с увеличением диаметра трубок в местах отбора импульса с 0,5 до 1 дюйма.

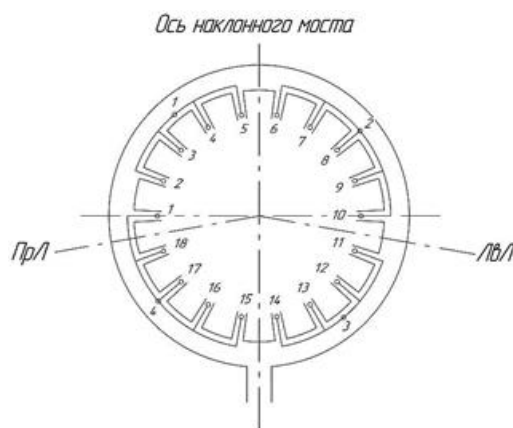


Рис. 6. Расположение и увязка отборов статического давления на кольцевом воздухопроводе и воздушных фурм доменной печи №1 «Криворожстали» [20]: ПрЛ, ЛвЛ – ось правой и левой чугунных леток; 1, 2 ... 18 – отборы статического давления на раструбе фурменных приборов; 1, 2, 3, 4 – отборы статического давления на кольцевом воздухопроводе горячего дутья

В 1995 году разработан принципиально новый метод бесконтактного измерения расхода горячего дутья по фурмам, сущность которого заключается в использовании охлаждаемой головки сопла в качестве калориметра. Экспериментальное опробование этого метода осуществлено на доменной печи № 4 комбината Азовсталь, показав хорошую результативность. Позднее этот метод прошел апробацию на доменных печах Алчевского, Череповецкого, Криворожского комбинатов, заводов Енакиевского и «Тулачермет», показав положительный результат. Преимуществом этого метода, является более низкий уровень капитальных затрат технического исполнения системы контроля, более высокая эксплуатационная надежность датчиков системы измерения. К недостаткам относятся инерционность системы и возможность применения лишь при наличии на доменной печи водяного охлаждения сопел фурменных приборов [21].

Заключение

После 1969 года метод измерения расхода горячего дутья на каждую фурму без ввода устройства внутрь фурменного прибора оказался самым надежным и эффективным. Он способствует снижению сопротивления проходу дутья и заслуживает дальнейшего развития в системах САРД [22] нового поколения. Основные пути совершенствования:

- выявить рациональные места отбора импульса для определения расхода дутья на фурму;
- учитывать опыт технологов-доменщиков ЗСМК и НЛМК;
- регулярно корректировать коэффициенты (ф-лы (1) и (2)).

Список литературы

1. Необходимость и возможность оснащения современных доменных печей системами автоматического распределения дутья нового поколения / Дружков В.Г., Ваганов А.И., Прохоров И.Е., Ширшов М.Ю. // Теплофизика и информатика в образовании, науке и производстве: сборник докладов II Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (ТИМ ` 2013) с международным участием. Екатеринбург: УрФУ, 2013. С. 182–184.
2. Дружков В.Г., Ширшов М.Ю. Влияние распределения дутья по фурмам на работу доменных печей // Наука и производство Урала: научно-технический и производственный журнал. Новотроицк: Изд-во НФ НИТУ «МИСиС», 2014. Вып.10. С. 21–23.
3. Дружков В.Г., Ширшов М.Ю. Причины неравномерного распределения дутья по фурмам доменных печей и необходимость оснащения их САРД нового поколения // Теория и технология металлургического производства. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. №1. С. 27–31.
4. Исследование особенностей распределения дутья по фурмам доменной печи объемом 1719 м³ комбината «Криворожсталь» / И.Г. Резницкий, С.Н. Лукьянец, А.П. Монаршук и др. // Изв. вузов. Черная металлургия. 1990. №2. С. 7–10.
5. Товаровский И.Г., Мирошниченко Б.И., Лукьянец С.Н. Принцип контроля расхода горячего дутья по фурмам доменной печи // Вопросы производства чугуна в доменных печах: тематический отраслевой сборник. М., 1984. С. 52–56.
6. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества: справочник. 4-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. 701 с.
7. Тарасов В.П. Газодинамика доменного процесса. М.: Металлургия, 1982. 222 с.
8. Бугаев К.М. Распределение газов в доменных печах. М.: Металлургия, 1974. 176 с.
9. Разработка и внедрение системы автоматического распределения дутья по фурмам / Н.Н. Сажнев, Н.И. Иванов, М.А. Стефанович и др. // Вопросы теплотехники и автоматизации металлургического производства: сб. науч. тр. / МГМИ им. Г.И. Носова. Магнитогорск, 1970. Вып. 76. С. 4–9.
10. Сажнев Н.Н. Система автоматического распределения дутья по фурмам доменной печи // Бюллетень ЦИИИ. 1969. №13. С. 39–40.
11. Похвиснев А.Н., Трекало С.К., Воскобойников В.Г. Использование показаний контрольно-измерительных приборов у доменной печи для установления оптимального режима // Теория и практика металлургии. 1937. №6. С. 19–29.
12. Похвиснев А.Н., Трекало С.К., Воловик Г.А. Распределение дутья по фурмам доменной печи № 1 Запорожстали // Теория и практика металлургии. 1938. № 5. С. 3–12.
13. Редько А.Н. Метод регулирования хода доменных печей // Сталь. 1946. №3. С. 145–149.
14. Стефанович М.А. Влияние распределения дутья по фурмам на работу доменной печи // Сталь. 1949. №6. С. 435–503.
15. Гиммельфарб А.А., Ефименко Г.Г. Автоматическое управление доменным процессом. М.: Металлургия, 1960. 309 с.
16. Автоматическое регулирование распределения дутья по фурмам доменной печи Кузнецкого металлургического комбината / Б.Н. Жеребин, В.А. Хромов, П.П. Мишин и др. // Сталь. 1964. №4. С. 292–296.
17. Анализ работы доменной печи при автоматическом регулировании дутья по воздушным фурмам / Г.Е. Сенько, В.Н. Оноприенко, А.П. Царицын и др. // Сталь. 1965. №7. С. 590–593.
18. Работа доменной печи при автоматическом регулировании распределении дутья / Г.И. Чернов, Н.А. Евдокимов, Е.В. Мусэрский и др. // Металлург. 1965. №4. С. 8–10.
19. Довгаль А.М., Дуда Г.Д., Сокур Н.П. Формирование «главного импульса» САР распределения дутья по фурмам доменной печи // Автоматизация агломерационного и доменного производства. К.: Техника, 1969. С. 155–168.
20. Экспериментальное исследование распределения дутья и природного газа по воздушным фурмам / С.Н. Лукьянец, М.Т. Бузовера, С.Т. Шулико и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. 1991. №1. С. 9–12.
21. Автоматизированная система контроля расхода дутья по воздушным фурмам доменной печи / Н.М. Можаренко, В.В. Канаев, А.А. Параносенков, Г.В. Панчоха, Г.И. Орел, В.С. Листопадов, К.А. Дмитренко // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: сб. науч. тр. Днепропетровск: ИЧМ НАН України, 2005. Вип. 11. С. 34–42.
22. Результаты оценки равномерности распределения дутья по фурмам доменных печей / Ширшов М.Ю., Дружков В.Г., Павлов А.В., Прохоров И.Е. // Теория и технология металлургического производства. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. № 2. С. 27–31.

TECHNIQUES FOR MEASUREMENT OF A HOT BLAST VOLUME PER TUYERE IN A BLAST FURNACE HEARTH

Druzhkov Vitaly Gavrilovich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7 (3519) 298 430.

Shirshov Mikhail Yurievich – Postgraduate Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: shirshov1989@mail.ru.

Prokhorov Ivan Evgenievich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Abstract. This paper focuses on control and availability of reliable information about a hot blast volume in tuyeres of a blast furnace. The authors generalized various techniques for measurement of a hot blast volume per tuyere, applied for blast furnaces starting from the 1930's, and presented their classification. Flow rate meters, requiring no input of a measuring device into a blast flow, are of considerable practical interest at present and in future. It is proposed to use such measuring devices in systems of automatic distribution of blast (SADB) in tuyeres of a new generation.

Keywords: Unsteady distribution of blast in tuyeres, blast mode, hot blast flow rate in tuyeres, flow rate meters, classification of measuring devices, system of automatic distribution of blast (SADB) in tuyeres, static pressure tap in a diffuser, hot-blast circulating duct, calorimeter, SADB of a new generation.

References

1. Druzhkov V.G., Vaganov A.I., Prohorov I.E., Shirshov M.Yu. Neobходимость i возможность osnashcheniya sovremennykh domennykh pechey sistemami avtomaticheskogo raspredeleniya dutiya novogo pokoleniya [Need and possibility of equipping modern blast furnaces with automatic distribution systems of blasting of a new generation]. *Teplofizika i informatika v obrazovanii, nauche i proizvodstve* [Thermophysics and informatics in education, science and production: collection of papers of the 2nd All-Russian Scientific and Practical Conference of Students, PhD Students and Young Scientists (TIM'2013), including international participants]. Ekaterinburg: UrFU, 2013, pp. 182-184.
2. Druzhkov V.G., Shirshov M.Yu. Vliyaniye raspredeleniya dutiya po furmam na rabotu domennykh pechey [Effect of distribution of blast among tuyeres on performance of blast furnaces]. *Nauka i proizvodstvo Urala* [Science and production of the Urals]. Novotroitsk: the Novotroitsk branch of Moscow Institute of Steel and Alloys National University of Science and Technology, 2014, no. 10, pp. 21-23.
3. Druzhkov V.G., Shirshov M.Yu. Reasons for non-uniform distribution of blast among tuyeres of blast furnaces and a need for equipping them with automatic distribution systems of blasting of a new generation. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva* [Theory and technology of metallurgical facilities]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2014, no. 1, pp. 27-31.
4. Reznitskiy I.G., Lukyanets S.N., Monarshuk A.P., et al. Study of distribution of blast among tuyeres of a 1719 m³ blast furnace at Krivorozhstal works. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [News of universities. Ferrous metallurgy], 1990, no. 2, pp. 7-10.
5. Tovarovskiy I.G., Miroshnichenko B.I., Lukyanets S.N. Printsip kontrolya raskhoda goryachego dutiya po furmam domennykh pechi. [A concept of hot blast flow rate control in tuyeres of a blast furnace]. *Voprosy proizvodstva chuguna v domennykh pechakh* [Issues of pig iron production in blast furnaces: a subject branch collection]. Moscow: Metallurgy, 1984, pp. 52-56.
6. Kremlevskiy P.P. *Raskhodometry i schetchiki kolichestva* [Flow rate meters and quantity counters: a reference book.]. The 4th edition: revised and enlarged. Leningrad: Mechanical Engineering, 1989, 701 p.
7. Tarasov V.P. *Gazodinamika domennogo protsessa* [Gas dynamics of a blast furnace process]. Moscow: Metallurgy, 1982, 222 p.
8. Bugaev K.M. *Raspredelenie gazov v domennykh pechakh* [Distribution of gases in blast furnaces]. Moscow: Metallurgy, 1974, 176 p.
9. Sazhnev N.N., Ivanov N.I., Stefanovich M.A., et al. Razrabotka i vnedrenie sistemy avtomaticheskogo raspredeleniya dutiya po furmam [Development and introduction of a system of automatic distribution of blast among tuyeres]. *Voprosy teplotekhniki i avtomatizatsii metallurgicheskogo proizvodstva* [Issues of heat engineering and automation of metallurgical facilities: a collection of research papers of the Nosov Magnitogorsk Institute of Mining and Metallurgy]. Magnitogorsk: MGTU, 1970, no. 76, pp. 4-9.
10. Sazhnev N.N. Sistema avtomaticheskogo raspredeleniya dutiya po furmam domennykh pechi [A system of automatic distribution of blast among tuyeres of a blast furnace]. *Byulleten' TSIIN* [Bulletin of TSIIN], 1969, no. 13, pp.39-40.
11. Pokhvisnev A.N., Trekalo S.K., Voskoboinikov V.G. Ispolzovanie pokazaniy kontrolno-izmeritelnykh priborov u domennykh pechi dlya ustanovleniya optimalnogo rezhima [Use of blast furnace instrumentation readings to set an optimal mode]. *Teoriya i praktika metallurgii* [Theory and Practice of Metallurgy], 1937, no. 6, pp. 19-29.
12. Pokhvisnev A.N., Trekalo S.K., Volovik G.A. Raspredelenie dutiya po furmam domennykh pechi №1 Zaporozhstali [Distribution of blast among tuyeres of blast furnace no. 1 at Zaporozhstal works]. *Teoriya i praktika metallurgii* [Theory and Practice of Metallurgy], 1938, no. 5, pp. 3-12.
13. Redko A.N. Metod regulirovaniya khoda domennykh pechey [A method to control operation of blast furnaces]. *Stal'* [Steel], 1946, no. 3, pp. 145-149.
14. Stefanovich M.A. Vliyaniye raspredeleniya dutiya po furmam na rabotu domennykh pechi [Effect of distribution of blast among tuyeres on operation of a blast furnace]. *Stal'* [Steel], 1949, no. 6, pp. 435-503.
15. Gimmelfarb A.A., Efimenko G.G. *Avtomaticheskoe upravleniye domennym protsessom* [Automatic control of a blast furnace process]. Moscow: Metallurgy, 1960, 309 p.

16. Zherebin B.N., Khromov V.A., Mishin P.P., et al. Avtomaticheskoe regulirovanie raspredeleniya dutiya po furmam domennoy pechi Kuznetskogo metallurgicheskogo kombinata [Automatic control of distribution of blast among tuyeres of a blast furnace at the Kuznetsk Iron and Steel Works]. *Stal'* [Steel], 1964, no. 4, pp. 292-296.
17. Senko G.E., Onoprienko V.N., Tsaritsyn A.P., et al. Analiz raboty domennoy pechi pri avtomaticheskoy regulirovani dutiya po vozdushnym furmam [Blast furnace operation in automatic control of blast through air tuyeres]. *Stal'* [Steel], 1965, no. 7, pp. 590-593.
18. Chernov G.I., Evdokimov N.A., Muserskiy E.V., et al. Rabota domennoy pechi pri avtomaticheskoy regulirovani dutiya [Blast furnace operation in automatic control of blast]. *Metallurg* [Metallurg], 1965, no. 4, pp. 8-10.
19. Dovgal A.M., Duda G.D., Sokur N.P. Formirovanie «glavnogo impulsa» SAR raspredeleniya dutiya po furmam domennoy pechi [Formation of a "master pulse" of SADB in tuyeres of a blast furnace]. *Avtomatizatsiya aglomeratsionnogo i domennogo proizvodstva* [Automation of sintering and blast-furnace processes]. Kiev: Tekhnika, 1969, pp. 155-168.
20. Lukyanets S.N., Buzoverya M.T., Shuliko S.T., et al. Eksperimen- talnoe issledovanie raspredeleniya dutiya i prirodnogo gaza po vozdushnym furmam [Experimental studies of distribution of blast and natural gas among air tuyeres]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'* [Metallurgical and Mining Industries], 1991, no. 1, pp. 9-12.
21. Mozharensko N.M., Kanaev V.V., Paranosenkov A.A., Panchokha G.V., Orel G.I., Listopadov V.S., Dmitrenko K.A. Avtomatizirovannaya sistema kontrolya raskhoda dutiya po vozdushnym furmam domennoy pechi [Automatic control system for distribution of blast among air tuyeres of a blast furnace]. *Fundamentalnye i prikladnye problemy chernoy metallurgii* [Fundamental and applied problems of an iron and steel industry]. Dnepropetrovsk: IChM NAN Ukraine, 2005, no.11, pp. 34-42.
22. Shirshov M.Yu., Druzhkov V.G., Pavlov A.V., Prokhorov I.E. Resultaty otsenki ravnomernosti raspredeleniya dutiya po furmam domennykh pechey [Assessment of a uniform distribution of blast among tuyeres of blast furnaces]. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva* [Theory and technology of metallurgical facilities]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2014, no. 2, pp. 27-31.

Дружков В.Г., Ширшов М.Ю., Прохоров И.Е. Методы определения расхода горячего дутья на отдельно взятую фурму в горне доменной печи // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №2. С. 21–27.

Druzhkov V.G., Shirshov M.Yu., Prokhorov I.E. Techniques for measurement of a hot blast volume per tuyere in a blast furnace hearth. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 2, pp. 21–27.

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.771.074:621.771.25

ОПЫТ ПРОИЗВОДСТВА КРУГЛОГО СОРТОВОГО ПРОКАТА ИЗ СТАЛИ МАРКИ 60С2ХА С ПОВЫШЕННЫМИ ТРЕБОВАНИЯМИ К ГЛУБИНЕ ОБЕЗУГЛЕРОЖЕННОГО СЛОЯ В УСЛОВИЯХ ОАО «ММК»

Тулупов О.Н.¹, Моллер А.Б.¹, Левандовский С.А.¹, Кинзин Д.И.¹, Олина Анна²,
Новицкий Р.В.³, Дзюба А.Ю.³, Шурыгин В.И.³, Серпков Е.С.³

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

² Mubea IT Spring Wire, Простеёв, Чешская Республика

³ Магнитогорский металлургический комбинат, Магнитогорск, Россия

Аннотация. Металл, применяемый для изготовления пружин и рессор, должен обладать, кроме необходимой прочности в условиях статического, динамического или циклического нагружений, достаточно хорошей пластичностью, высокими пределами упругости и выносливости и высокой релаксационной стойкостью. На качество пружин и рессор влияет состояние поверхности прутков. Требования к качеству поверхности и глубине обезуглероженного слоя горячекатаного проката все более ужесточаются. К наиболее распространенным способам борьбы с ростом обезуглероженного слоя можно отнести управляемый нагрев стали. Целью исследования является обеспечение максимально возможной равномерности деформации и, тем самым, уменьшение толщины обезуглероженного слоя. В работе проведена оптимизация калибровки промежуточных клетей и проволочного блока. При прокатке по новой схеме деформации застреваний не произошло, итоговые размеры прокатываемого круглого профиля диаметром 14 мм находились в пределах существующих допусков на продукцию ($\pm 0,3$ мм). Результатом применения новой калибровки стало производство проката с высоким качеством поверхности, а в дальнейшем и автомобильных пружин, удовлетворяющих высоким эксплуатационным требованиям.

Ключевые слова: пружинная сталь, обезуглероженный слой, неравномерность деформации, калибровка валков, овальность сечения, качество поверхности.

Введение

Известно, что пружинная сталь – это низколегированный сплав, среднеуглеродистая или высокоуглеродистая сталь с повышенным пределом текучести. Это позволяет изделиям из пружинной стали возвращаться к исходной форме, несмотря на значительный изгиб и скручивание. Пружины и рессоры испытывают в работе многократные знакопеременные нагрузки и после их снятия должны полностью восстанавливать свои первоначальные размеры. В связи с такими условиями работы, металл, применяемый для изготовления пружин и рессор, должен обладать, кроме необходимой прочности в условиях статического, динамического или циклического нагружений, достаточно хорошей пластичностью, высокими пределами упругости и выносливости и высокой релаксационной стойкостью, а при работе в агрессивных средах (ат-

мосфере пара, морской воде и др.) должен быть также и коррозионностойким.

На качество пружин и рессор влияет состояние поверхности прутков, проволоки и полос. Наличие наружных дефектов (трещин, закатов, плен, волосовин, раковин, заусенцев, вдавленной окалины и др.), а также обезуглероженного слоя снижает упругие и циклические свойства металла. Поэтому ранее в процессе изготовления пружин наружные дефекты на поверхности прутков и полос удалялись зачисткой или шлифованием, а глубина обезуглероженного слоя регламентировалась государственным стандартом на рессорно-пружинную сталь. В настоящее время наиболее привлекательными с позиций снижения себестоимости являются технологии, включающие минимальное количество операций и обеспечивающие ресурсосбережение. Современной тенденцией в изготовлении пружин является применение горячекатаного проката без обточки поверхности.

В связи с этим требования к качеству поверхности и глубине обезуглероженного слоя горячекатаного проката все более ужесточаются.

Явление обезуглероживания поверхности металла заключается в том, что газы, находящиеся в печи и содержащие окислители, вступают в химическое соединение с углеродом, входящим в состав стали. В результате получают газообразные соединения, которые выделяются в атмосферу, а поверхностный слой металла обедняется углеродом. С течением времени при повторных нагревах обезуглероженный слой на металле становится толще, причем иногда этот слой состоит даже из чистого железа. Вследствие обезуглероживания механические качества поверхностного слоя значительно снижаются и могут быть выявлены только при специальном исследовании.

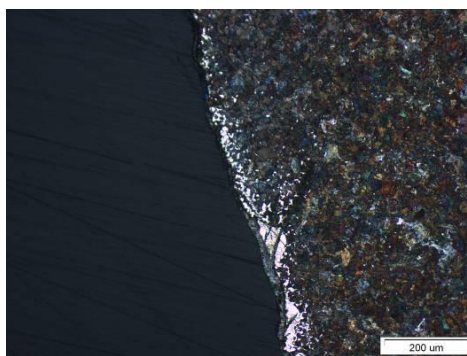
Возможности обезуглероживания (в той или иной мере) подвержены все типы сталей, и потому следует иметь в виду, что оно может снижать качество деталей, изготовленных из стали любой марки. Практически можно считать, что если в сталях с содержанием углерода 0,20–0,25% наличие обезуглероженного слоя поверхности опасно лишь в определенных, специальных случаях, то у сталей с содержанием углерода в 0,40–0,45% оно должно быть признано опасным недостатком, с которым всегда необходимо считаться при решении вопроса о технологии производства той или иной детали. Поверхностное обезуглероживание, зарождающееся еще при горячей механической обработке слитка, является одним из серьезных пороков современного производства сталей, значительно снижающих прочность сталей при переменных нагрузках.

Степень обезуглероживания и глубину обезуглероженного слоя можно определить несколькими способами, из которых наиболее распространенными являются следующие: измерение твердости поверхности образца до нагрева и после него в заданной атмосфере (твердость зависит от содержания углерода) и анализ микроструктуры, выявляющий картину происшедших в стали превращений. Возможно, проведение химических анализов последовательно срезаемых слоев металла, а также нахождение изменения его массы [1].

К наиболее распространенным способам борьбы с ростом обезуглероженного слоя можно

отнести: управляемый нагрев стали и его особенности (**рис. 1**), выплавку стали с определенным химическим составом (легирование), управление процессом обработки стали давлением, термическую обработку готовой горячекатаной стали [1] и физические способы устранения обезуглероженного слоя.

Все перечисленные способы отличаются различной эффективностью и изучены не одинаково, в связи с разной сложностью. Наименьшее количество патентов на изобретения и полезные модели, а также публикаций можно обнаружить по тематике управления процессом обработки давлением с целью снижения величины обезуглероженного слоя пруженных сталей [2].



Глубина обезуглероживания, мм	Факт	Требования ГОСТ 1763-68
Частичного	0,20	0,14
Полного	0,06	0,03

Рис. 1. Результаты прокатки после управляемого нагрева без изменения калибровки

В связи с ранее названным, заслуживает отдельного внимания исследование резервов пластической деформации при прокатке в калибрах. Целью исследования является обеспечение максимально возможной равномерности деформации и, тем самым, уменьшение толщины обезуглероженного слоя.

Технические и технологические разработки

Применительно к стану 170 были рассмотрены следующие варианты оптимизации калибровки по критерию неравномерности деформации [3, 4] при прокатке круглого профиля диаметром 14 мм:

- 1) оптимизация калибровки проволочного блока при увеличении сечения подката и росте количества проходов в блоке с 2-х до 4-х;
- 2) оптимизация калибровки обжимной группы клеток с получением квадратного сечения на промежуточном рольганге;
- 3) оптимизация калибровки черновой группы клеток стана (клетки №2–8) с использованием системы калибров ромб-квадрат;
- 4) моделирование прокатки заготовки увеличенного сечения (152×170 мм) в комбинации с описанными выше вариантами калибровки валков.

Из рассмотренных вариантов решения поставленной задачи наиболее перспективными с точки зрения снижения толщины обезуглероженного слоя являются варианты, связанные с увеличением размера заготовки и, как следствие, с увеличением суммарного коэффициента вытяжки. При этом с точки зрения минимизации затрат на изменение технологии и проведение опытных прокаток наиболее предпочтительным является вариант 1, связанный с оптимизацией калибровки валков проволочного блока. Опытную прокатку по данному варианту калибровки возможно провести с минимальными затратами на подготовку. Результаты прокатки с применением новой калибровки представлены на **рис. 2**. Наглядно прослеживается положительное влияние от применения скорректированной калибровки, позволившей обеспечить более равномерную деформацию металла по сечению. Недопустимо высокие значения контрольных параметров наблюдаются в местах залегания поверхностных дефектов. Поэтому дальнейшие мероприятия по улучшению качества раската должны быть направлены на применение прокатных валков с улучшенным состоянием поверхности.

Основным критерием эффективности коррекции калибровки являлась возможность «выкатывания» образовавшегося обезуглероженного

слоя вследствие реализации более равномерной деформации металла при прокатке. В существующем и регулярно применяющемся уже более двадцати лет структурно-матричном подходе к описанию, анализу и проектированию режимов сортовой прокатки равномерность деформации в калибрах различной формы характеризуется коэффициентом неравномерности $K_{\text{нер}}$.

Стоит особо отметить, что высокая неравномерность деформации в большей степени способствует износу прокатных валков и, как следствие, образованию новых зон повышенной неравномерности.

Более равномерная деформация может способствовать лучшей выкатке дефектов, которые могли быть образованы на стадиях получения металла и заготовки и, что особенно важно, положительно влияет на равномерное распределение обезуглероженного слоя как по длине раската, так и по его сечению. Следовательно, для снижения количества дефектов и повышения качества поверхности прокатной продукции необходимо обеспечивать как можно меньший уровень неравномерности деформации. Кроме того, уменьшение внутренних остаточных напряжений позволит более эффективно использовать металлопрокат в дальнейших переделах.

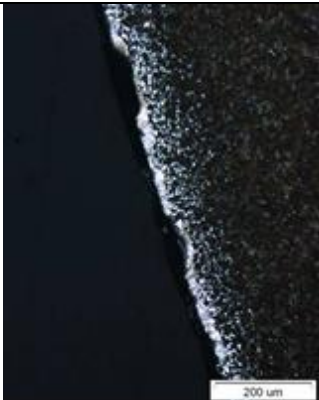
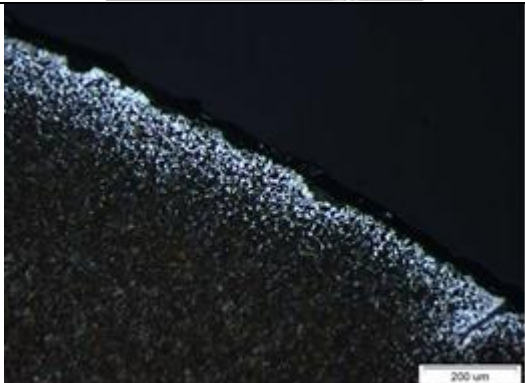
Фото	Глубина частичного обезуглероживания, мм	Глубина полного обезуглероживания, мм
	0,12	0,02 длиной 0,7
	0,23 (по дефекту)	0,03 длиной 0,65 мм

Рис. 2. Результаты прокатки после управляемого нагрева с изменением калибровки

Из всех причин, вызывающих неравномерность деформации, особенно значимой является несоответствие формы инструмента форме деформируемого тела. При сортовой прокатке такое несоответствие неизбежно существует.

Несовершенство схем калибровок валков приводит к уменьшению степени гомотетичности форм деформируемого тела и инструмента [5, 6]. Повышение степени подобия этих форм позволяет снизить неравномерность деформации. В большинстве случаев сортовой прокатки калибровщикам приходится иметь дело с негомотетичными формами (рис. 3).

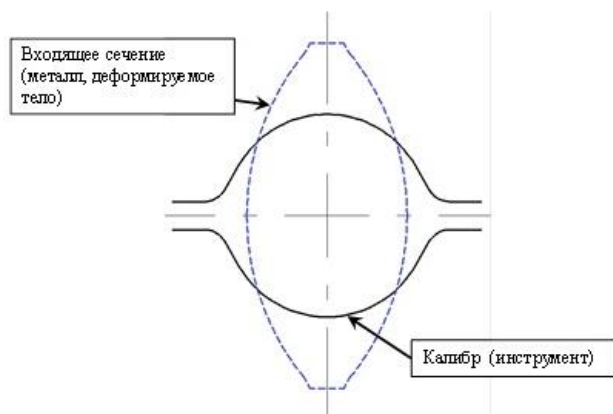


Рис. 3. Пример негомотетичной формы металла и калибра

Снижение неравномерности деформации позволяет:

- уменьшить износ прокатных валков;
- снизить расход энергии на процесс прокатки металла;
- получить более равномерно распределённые нагрузки при прокатке по ширине, распределяя усилия на прокатные валки;
- повысить стабильность процесса по критерию «точность»;
- получить более точные геометрические размеры готовой продукции;
- продлить срок службы механизмов прокатных клетей.

Опираясь на структурно-матричный подход, для оценки неравномерности деформации при формоизменении металла в калибрах используется коэффициент неравномерности деформации $K_{нер}$.

$K_{нер}$ можно рассчитывать как для процесса формоизменения внутри одного очага деформации, так и для двух рядом расположенных.

Величина среднеквадратического отклонения компонента матрицы формоизменения количественно может отражать неравномерность формоизменения как в одном калибре, так и в двух смежных. В этом случае интегральный коэффициент неравномерности формоизменения для дефор-

мации металла в двух калибрах будет иметь вид

$$K_{нер} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\lambda_{ij-1} \lambda_{ij} - \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_{ij-1} \lambda_{ij}}{n} \right)^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\lambda_{ij-1} \lambda_{ij})^2}{n} - \left(\frac{\sum_{i=1}^n \lambda_{ij-1} \lambda_{ij}}{n} \right)^2},$$

где $K_{нер}$ – коэффициент неравномерности деформации; n – количество векторов описывающих четверть сечения калибра или входящего сечения металла; λ – соотношение каждого вектора входящего сечения к вектору выходящего (рис. 4).

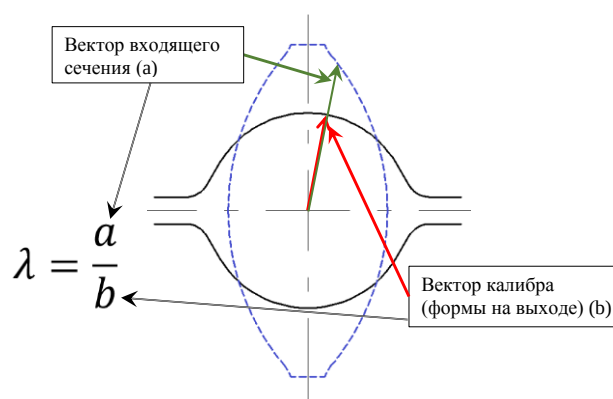


Рис. 4. Пояснения к определению коэффициента неравномерности деформации

Как показывает практика, применения коэффициента неравномерности деформации его значения для случая сортовой прокатки и в различных системах калибров должны варьироваться в диапазоне от 0,18 до 0,30 [3].

Различные системы калибров, особенности деформации, форма калибров и регламентированные при прокатке зазоры в большой степени оказывают воздействие на формирования численного значения коэффициента неравномерности деформации.

Для оценки интегрального значения коэффициента неравномерности деформации руководствуются классическими статистическими пара-

метрами и характеристиками, такими как стандартное отклонение, наименьшие квадраты, среднее арифметическое, медианная оценка и др.

Результаты исследования

Анализ и сопоставление неравномерности деформации металла при прокатке по существующей и новой калибровке проводили на основе технологических режимов прокатки круга диаметром 14 мм.

Для вычисления коэффициента неравномерности деформации все представленные формы калибров и промежуточных сечений раската подвергались оцифровке на основе структурно-матричного подхода.

На основе вычисленных коэффициентов неравномерности деформации для технологических карт (назовём их «Штатная калибровка» и «Новая калибровка») были построены диаграммы распределения значений коэффициента неравномерности деформации, которые представлены на рис. 5 и 6.

Также рассчитаны статистические характеристики для полученных значений коэффициентов неравномерности деформации, которые представлены в табл. 1 и необходимые величины для целенаправленной коррекции межвалковых зазоров, обеспечивающие предупреждение дефектов раската по геометрическим показателям [7, 8].

Неравномерность деформации для штатной калибровки

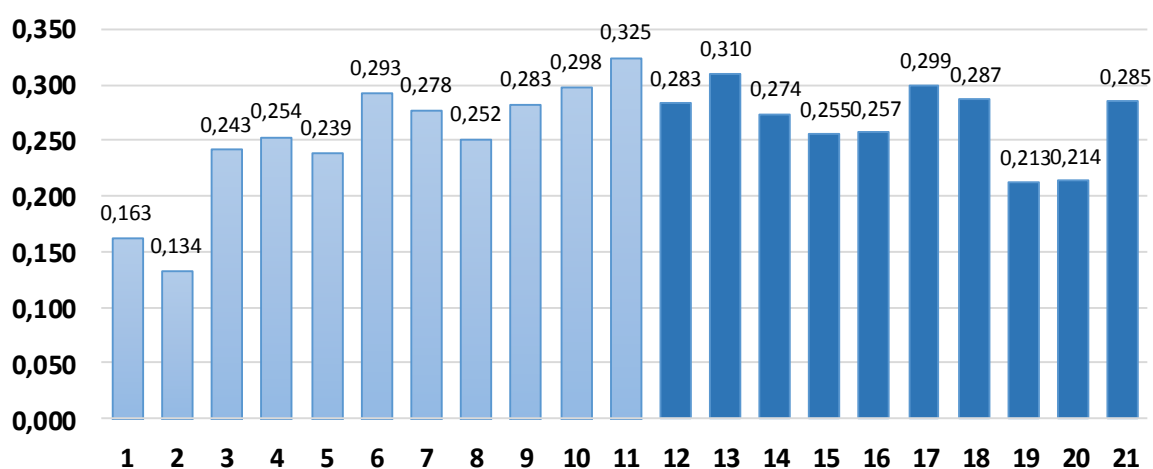


Рис. 5. Распределение $K_{нр}$ по проходам для «Штатной калибровки»

Неравномерность деформации для новой калибровки

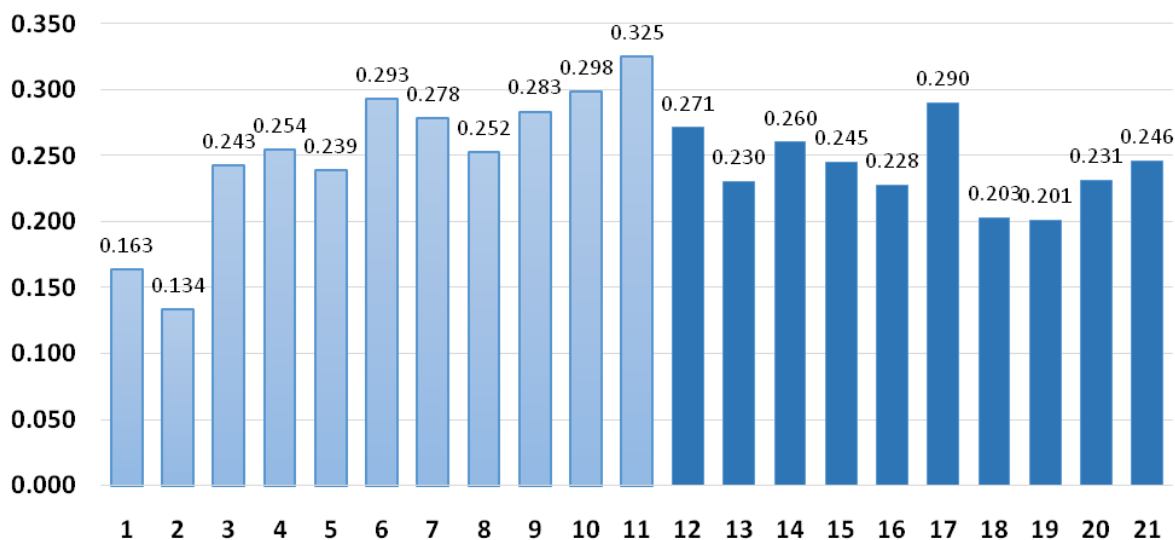


Рис. 6. Распределение $K_{нр}$ по проходам для «Новой калибровки»

Таблица 1
Статистические характеристики
для оценки неравномерности деформации

Характеристика	Штатная калибровка		Новая калибровка	
	Все проходы	Проходы с 12 по 21	Все проходы	Проходы с 12 по 21
Стандартное отклонение	0,04707	0,03273	0,04508	0,02939
Сумма квадратов	1,45353	0,55050	1,31201	0,45910
Вариация	0,18171	0,12562	0,18320	0,12352
Среднее арифметическое	0,25905	0,26053	0,24605	0,23797
Медиана	0,27411	0,25680	0,24600	0,23812
Максимум	0,32484	0,29948	0,32484	0,29013
Минимум	0,13357	0,21311	0,13357	0,20124
Размах	0,19126	0,08648	0,19126	0,08943

Анализируя полученные сведения, можно сделать следующие выводы:

- стандартное отклонение и среднее арифметическое значение для новой калибровки меньше, следовательно, неравномерность деформации стала меньше и более стабильной, о чём также свидетельствует вариация;

- меньшее значение медианы для новой калибровки свидетельствует об общем снижении числовых значений в выборке коэффициентов неравномерности деформации;

- сумма квадратов для значений с 12 по 21 проходы сократилась на 16,6%, что также сигнализирует о сокращении масштабов исследуемой величины;

- максимальные и минимальные значения для проходов с 12 по 21 сократились, что свидетельствует о снижении пиков и колебаний неравномерности в новой калибровке.

На основе приведённой информации можно сделать вывод, что предлагаемая калибровка является более эффективной с точки зрения показателя неравномерности деформации.

Снижение неравномерности деформации и её более равномерное распределение по проходам позволило получить продукцию с более равномерно распределённым обезуглероженным слоем, а следовательно, и с более равномерно распределёнными механическими свойствами поверхности, что является критически важным для

условий эксплуатации пружинной стали.

При подборе возможных режимов деформации преследовалась цель минимального «вмешательства» в существующую калибровку. Такой подход позволяет снизить затраты на внедрение полученных результатов и уменьшить влияние фактора рассогласованности существующей технологии и новых интегрируемых решений. Итоговый предложенный вариант изменений схемы деформации позволил ещё и повысить универсальность использования парка валков через создание условий возможности производства профиля круг диаметром 14 мм по часто реализуемой на стане схеме прокатки круга диаметром 6,5 мм, дополнительно к существующей, в два раза реже применяемой схеме круг диаметром 5,5 мм. Данное преимущество способствует повышению эффективности производства, снижению технологических простоев при переходах с выполнения одного заказа на другой и позволяет упростить решение задачи оптимизации парка валков [9].

Кроме того, при переходе на новую калибровку с завершением формирования готового профиля в четвертой позиции чистового проволочного блока, то есть на валках с уменьшенным диаметром, произошло снижение усилия и момента прокатки в силу того, что диаметр валков в блоке в 1,5 раза меньше и длина очага деформации, а значит, и площадь контакта снижены. В результате даже при повышении скорости прокатки с 15 до 18 (м/с) и работе клетей при пониженных оборотах нагрузка на клетки и привод не превысила номинальных значений, находясь в диапазоне 24–85% (номинальная загрузка – 100%). Сравнительный анализ загрузки электродвигателей главных приводов по моменту прокатки до и после применения нового режима деформации для клетей чистового блока приведен на **рис. 7**.

Повышение скорости прокатки круга диаметром 14 мм связано с переносом получения готового профиля ближе к концу (четвертая позиция чистового десятиклетевго проволочного блока) стана и необходимостью пропорционального роста скорости. Данный факт не влечёт за собой повышение производительности стана.

При прокатке по новой схеме деформации застреваний не произошло, итоговые размеры прокатываемого круглого профиля диаметром 14 мм в основном находились в пределах существующих допусков на продукцию ($\pm 0,3$ мм) (**табл. 2**).

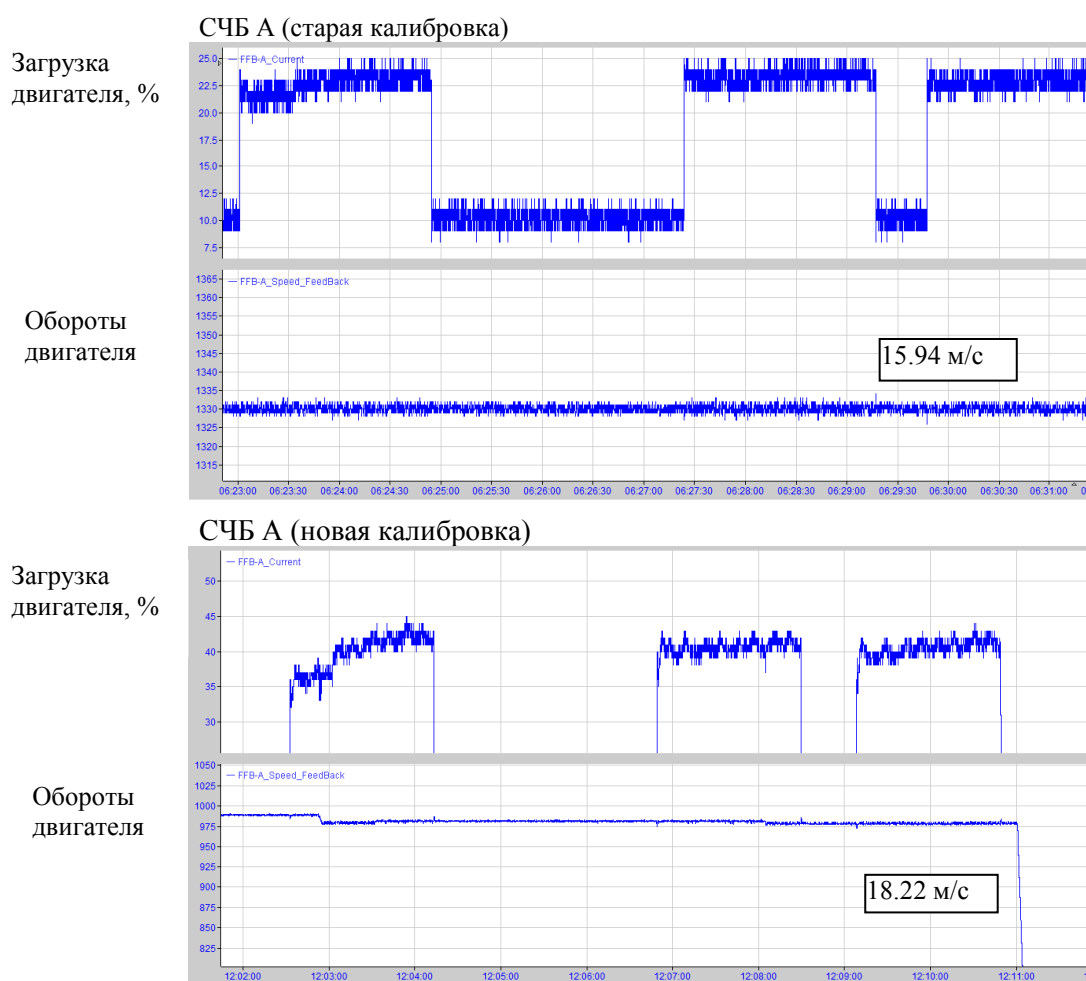


Рис. 7. Сравнение загрузки двигателя проволочного блока

Таблица 2
Размеры образца круга 14 из стали марки 60С2ХА
после опытной прокатки

Параметр	Значение	
По высоте	14,0 мм	
По ширине (по марке)	13,85 мм	
По диагоналям *	1	14,0 мм
	2	14,2 мм

* Результат смещения «стола» вводной арматуры на 4-й позиции.

Увеличение выпуска чистового калибра, произведенное ранее с целью избавления от периодического уса, в некоторой степени способствовало росту овальности. Таким образом, данное решение только частично компенсировало влияние реальной причины возникновения периодических колебаний раската. Поэтому в качестве одного из мероприятий для уменьшения овальности готового профиля можно рекомендовать поиск и устранение механической причины периодических колебаний раската с частотой, равной одному обороту валка в чистовой клетке, и уменьшение выпуска чистового калибра с 24 до 22 град.

Заключение

Осуществленный переход на невыработанные калибры при опытной прокатке круга диаметром 14 мм в промежуточной группе клеток и применение новых режимов обжатий в совокупности с разработанными калибровками и выполнение большинства требований по химическому составу выплавленной стали и специализированному режиму нагрева заготовки позволило обеспечить высокое качество поверхности проката и необходимые эксплуатационные характеристики подвергнутых испытаниям в компании «Мубеа» опытных пружин.

Таким образом, решение научно-производственной задачи по производству сортового проката специального назначения является комплексом мероприятий и нововведений [10]. Одну из центральных ролей играет научный инструмент целенаправленной коррекции калибровки профиля, обеспечивающей снижение неравномерности деформации. Результатом применения новой калибровки стало производство проката с высоким качеством поверхности, а в дальнейшем и автомобильных пружин, удовлетворяющих высоким эксплуа-

тационным требованиям.

Список литературы

1. Темлянец М.В., Михайленко Ю.Е. Окисление и обезуглероживание стали в процессах нагрева под обработку давлением. М.: Теплотехник, 2006. 200 с.
2. Смирнов В.К., Шилов В.А., Инатович Ю.В. Калибровка прокатных валков. М.: Теплотехник, 2010. 490 с.
3. Совершенствование существующих технологических схем прокатки на основе оптимизации форм калибров с целью повышения качества сортовой продукции / Левандовский С.А., Моллер А.Б., Назаров Д.В., Зайцев А.А. // Моделирование и развитие процессов ОМД. 2006. № 1. С. 129–137.
4. Structural-matrix models for long product rolling processes modeling production traceability and forming consumer properties of products / Tulupov O.N., Moller A.B., Kinzin D.I., Levandovskiy S.A., Ruchinskaya N.A., Nalivaiko A.V., Rychkov S.S., Ishmetev E.N. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. № 5 (45). С. 46–50.
5. Повышение точности прокатки сортовых профилей простой и фасонной форм / Тулунов О.Н., Моллер А.Б., Кинзин Д.И., Левандовский С.А., Новицкий Р.В., Рычков С.С. // Металлургические процессы и оборудование. 2013. № 4 (34). С. 99–105.
6. Современные научно-технические подходы для повышения эффективности процессов сортовой прокатки на технологических комплексах DANIELI / Тулунов О.Н., Луценко А.Н., Моллер А.Б., Кинзин Д.И., Трайно А.И. // Калибровочное бюро. 2013. № 2. С. 56–76.
7. Использование адаптивной структурно-матричной модели для управления качеством сортового проката с разработкой рациональных предупреждающих действий / Моллер А.Б., Ручинская Н.А., Зайцев А.А., Тулунов О.Н., Луценко А.Н. // Неделя металлов в Москве: сборник трудов конференций и семинаров; редкол.: Сивак Б.А. и др.. М., 2007. С. 357–367.
8. Управление качеством сортового проката путем использования рациональных предупреждающих действий при настройке станов / Тулунов О.Н., Ручинская Н.А., Моллер А.Б., Лимарев А.С., Луценко А.Н. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2007. № 4. С. 73–80.
9. Саранча С.Ю., Моллер А.Б. Повышение эффективности сортопркатного производства ОАО «ММК» путем увеличения точности металлургических механизмов // Механическое оборудование металлургических заводов. 2014. № 3. С. 25–29.
10. Развитие комплексной оценки качества сортопркатной металлопродукции / Моллер А.Б., Левандовский С.А., Найдёнова А.В., Логинова И.В. // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2014. № 2. С. 42–46.
11. Колокольцев В.М. Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. История. Развитие // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. №1(45). С. 5–6.
12. Колокольцев В.М., Разинкина Е.М. Университетский комплекс: интеграция и непрерывность // Высшее образование в России. 2011. №5. С. 3–10.
13. Производство высокопрочной стальной арматуры для железобетонных шпал нового поколения / Чукин М.В., Корчунов А.Г., Бакишинов 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.
14. Стальная проволока / Белалов Х.Н., Клековкин А.А., Клековкина Н.А., Гун Г.С., Корчунов А.Г., Полякова М.А. Магнитогорск, 2011.
15. Производство стальной проволоки / Белалов Х.Н., Клековкина Н.А., Клековкин А.А., Никифоров Б.А., Гун Г.С., Корчунов А.Г., Зюзин В.И., Кулеша В.А., Савельев Е.В. / Белалов Х.Н. Магнитогорск, 2005.
16. 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.
17. 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.
18. Создание и развитие теории квалиметрии металлургии / Гун Г.С., Рубин Г.Ш., Чукин М.В., Гун И.Г., Мезин И.Ю., Корчунов А.Г. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2003. №5. С. 67.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

EXPERIENCE IN THE PRODUCTION OF ROUND LONG PRODUCTS OF STEEL GRADE 60S2KHA WITH HIGHER REQUIREMENTS TO A DECARBURIZED LAYER DEPTH AT OJSC MMK

Tulupov Oleg Nikolayevich – D.Sc. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7 (3519) 298 525. E-mail: tulupov@mail.ru.

Moller Alexander Borisovich – D.Sc. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7 (3519) 298 525. E-mail: amoller@mail.ru.

Levandovskiy Sergey Anatol'evich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7 (3519) 298 525. E-mail: levandovskiy@mail.ru.

Kinzing Dmitriy Ivanovich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7 (3519) 298 525. E-mail: kinzin@mail.ru.

Olina Anna – Engineer, Laboratory for Development of Semi-products, Mubea IT Spring Wire, Prostějov, Czech Republic.

Novitskiy Ruslan Vitalievich – Head of the Long Products Shop, Open Joint Stock Company Magnitogorsk Iron and Steel Works, Magnitogorsk, Russia.

Dzyuba Anton Yurievich – Head of the Long Products Laboratory, Research and Development Center, Open Joint Stock Company Magnitogorsk Iron and Steel Works, Magnitogorsk, Russia.

Shurygin Vladimir Ivanovich – Chief Roll Pass Designer, Research and Development Center, Open Joint Stock Company Magnitogorsk Iron and Steel Works, Magnitogorsk, Russia.

Serpkov Egor Sergeevich – Lead Engineer of the Group for the Rolling Division, Research and Development Center, Open Joint Stock Company Magnitogorsk Iron and Steel Works, Magnitogorsk, Russia.

Abstract. Steel used to produce springs and carriage springs should have the required strength under static, dynamic or cyclic loadings, good ductility, high limits of elas-

ticity and endurance, and high relaxation resistance. The quality of springs and carriage springs depends on a surface of rods. Requirements to the surface quality and depth of a

decarburized layer of hot rolled products become stricter. The most common methods for preventing a growth of the decarburized layer include controlled steel heating. The aim of the research is to provide maximum possible uniform deformation and reduction of the decarburized layer thickness. This article focuses on roll pass design optimization for intermediate stands and a finishing high-speed rod block. When rolling in a new pattern of deformation, we had no sticking of metal in the stands and finished sizes of rolled round long products with a diameter of 14 mm were within the existing tolerances for products (± 0.3 mm). A new roll pass design resulted in production of rolled products with a high surface quality, and in future we will have a possibility to produce automotive coil springs, satisfying high performance requirements.

Keywords: Spring steel, decarburized layer, non-uniform deformation, roll pass design, cross-section ovality, surface quality.

References

1. Temlyantsev M.V., Mikhaylenko Yu.E. *Okislenie i obezuglerozhivanie stali v protsessakh nagreva pod obrabotku davleniem* [Steel oxidation and decarburization in the process of heating for metal forming]. Moscow: Teplotekhnika, 2006, 200 p.
2. Smirnov V.K., Shilov V.A., Inatovich Yu.V. *Kalibrovka prokatnykh valkov* [Roll pass design]. Moscow: Teplotekhnika, 2010, 490 p.
3. Levandovskiy S.A., Moller A.B., Nazarov D.V., Zaitsev A.A. Sovershenstvovanie sushchestvuyushchikh tekhnologicheskikh skhem prokatki na osnove optimizatsii form kalibrov s tselyu povysheniya kachestva sortovoy produktsii [Improvement of existing rolling technologies by optimization of a pass design shape to improve the quality of long products]. *Modelirovanie i razvitie protsessov OMD* [Simulation and development of metal forming processes], 2006, no. 1, pp. 129-137.
4. Tulupov O.N., Moller A.B., Kinzin D.I., Levandovskiy S.A., Ruchinskaya N.A., Nalivaiko A.V., Rychkov S.S., Ishmetiev E.N. Structural-matrix models for long product rolling processes modeling production traceability and forming consumer properties of products. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Novos Magnitogorsk State Technical University], 2013, no. 5 (45), pp. 46-50.
5. Tulupov O.N., Moller A.B., Kinzin D.I., Levandovskiy S.A., Novitskiy R.V., Rychkov S.S. Povyshenie tochnosti prokatki sortovykh profiley prostoy i fasonnoy form [Improvement of rolling accuracy to produce section products with simple and shaped forms]. *Metallurgicheskie protsessy i oborudovanie* [Metallurgical processes and equipment], 2013, no. 4 (34), pp. 99-105.
6. Tulupov O.N., Lutsenko A.N., Moller A.B., Kinzin D.I., Traino A.I. Sovremennye nauchno-tekhnicheskie podkhody dlya povysheniya effektivnosti protsessov sortovoy prokatki na tekhnologicheskikh kompleksakh DANIELI [Modern scientific and technical approaches to increase efficiency of section rolling technology on Danieli facilities]. *Kalibrovochnoe byuro* [Pass design], 2013, no. 2, pp. 56-76.
7. Moller A.B., Ruchinskaya N.A., Zaitsev A.A., Tulupov O.N., Lutsenko A.N. Ispolzovanie adaptivnoy strukturno-matrichnoy modeli dlya upravleniya kachestvom sortovogo prokata s razrabotkoy ratsionalnykh preduprezhdayushchikh deystviy [Using an adaptive structural matrix model for long products quality control, including development of reasonable preventive measures]. *Nedelya metallov v Moskve sbornik trudov Konferentsiy i Seminarov. redkol. : Sivak B. A. i dr.* [A collection of papers presented at conferences and seminars at the Moscow Metal Week. The editorial staff includes Sivak B. A. et al.]. Moscow, 2007, pp. 357-367.
8. Tulupov O.N., Ruchinskaya N.A., Moller A.B., Limarev A.S., Lutsenko A.N. Upravlenie kachestvom sortovogo prokata putem ispolzovaniya ratsionalnykh preduprezhdayushchikh deystviy pri nastroyke stanov [Long products quality control by taking reasonable preventive measures, when adjusting mills]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Novos Magnitogorsk State Technical University], 2007, no. 4, pp. 73-80.
9. Sarancha S.Yu., Moller A.B. Povyshenie effektivnosti sortoprokatnogo proizvodstva OAO «MMK» putem uvelicheniya tochnosti metallurgicheskikh mekhanizmov [Improvement of efficiency of the OJSC MMK section rolling facilities with increasing precision of metallurgical machines]. *Mekhanicheskoe oborudovanie metallurgicheskikh zavodov* [Mechanical equipment of metallurgical plants], 2014, no. 3, pp. 25-29.
10. Moller A.B., Levandovskiy S.A., Naidenova A.V., Loginova I.V. Razvitie kompleksnoy otsenki kachestva sortoprokatnoy metalloproduktii [Development of the integrated quality assessment of long products]. *Mashinostroyeniye: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Mechanical Engineering: Network Electronic Scientific Journal], 2014, no. 2, pp. 42-46.
11. Kolokoltsev V.M. Nosov Magnitogorsk State Technical University. History. Development. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Novos Magnitogorsk State Technical University], 2014, no. 1(45), pp. 5-6.
12. Kolokoltsev V.M., Razinkina E.M. A university complex: integration and steadiness. *Vysshee obrazovanie v Rossii* [Higher education in Russia], 2011, no. 5, pp. 3-10.
13. Chukin M.V., Korchunov A.G., Bakshinov V.A., Baryshnikov M.P., Gun G.S., Dolgiy D.K., Efimova Yu.Yu., Kolokoltsev V.M., Koptseva N.V., Kuranov K.Yu., Lebedev V.N., Mezin I.Yu., Polyakova M.A., Chukin V.V. *Proizvodstvo vysokoprochnoy stal'noy armatury dlya zhelezobetonnykh shpal novogo pokoleniya: pod obshhej redaktsiej M.V. Chukina* [Production of high-strength steel reinforcement bars for concrete sleepers of a new generation: under the general editorship of Chukin M.V.]. Moscow, 2014.
14. Belalov Kh.N., Klekovkin A.A., Klekovkina N.A., Gun G.S., Korchunov A.G., Polyakova M.A. *Stal'naya provoloka* [Steel wire]. Magnitogorsk, 2011.
15. Belalov Kh.N., Klekovkina N.A., Klekovkin A.A., Nikiforov B.A., Gun G.S., Korchunov A.G., Zyuzin V.I., Kulesha V.A., Saveliev E.V. *Proizvodstvo stal'noy provoloki* [Steel wire production]. Magnitogorsk, 2005.
16. Chukin M.V., Gun G.S., Korchunov A.G., Polyakova M.A. Prospects of production of high-strength steel reinforcement bars from high-carbon steel grades. *Chernye metally* [Ferrous metals], 2012, no. 12, pp. 8-16.
17. Ushakov S.N., Chukin M.V., Gun G.S., Korchunov A.G., Polyakova M.A. High-strength reinforcement bars for concrete sleepers of a new generation. *Put' i putevoe khozyajstvo* [Railways and railway facilities], 2012, no. 11, pp. 25-27.
18. Gun G.S., Rubin G.Sh., Chukin M.V., Gun I.G., Mezin I.Yu., Korchunov A.G. Metallurgy quality theory design and development. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Novos Magnitogorsk State Technical University], 2003, no. 5, pp. 67.

Методы определения расхода горячего дутья на отдельно взятую фурму в горне доменной печи / Тулупов О.Н., Моллер А.Б., Левандовский С.А., Кинзин Д.И., Олина Анна, Новицкий Р.В., Дзюба А.Ю., Шурыгин В.И., Серпков Е.С. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №2. С. 28–36.

Tulupov O.N., Moller A.B., Levandovskiy S.A., Kinzin D.I., Olina Anna, Novitskiy R.V., Dzyuba A.Yu., Shurygin V.I., Serpkov E.S. Experience in the production of round long products of steel grade 60s2kha with higher requirements to a decarburized layer depth at OJSC MMK. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Novos Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 2, pp. 28-36.

УДК 621.74

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ОЧАГАХ ДЕФОРМАЦИИ И ОЦЕНКА ИЗНОСА ВАЛКОВ УНИВЕРСАЛЬНЫХ КЛЕТЕЙ ПРИ ПРОКАТКЕ ШИРОКОПОЛОЧНЫХ БАЛОК

Лехов О.С., Туев М.Ю.

Российский государственный профессионально-педагогический университет, Екатеринбург, Россия

Аннотация. Рассмотрены особенности износа валков универсальных клетей при прокатке широкополочных балок. Проведено исследование напряжённо-деформированного состояния металла в двух зонах очага деформации при формировании стенки и полки балки. Результаты расчёта процесса прокатки представлены в виде эпюр распределения нормальных и касательных напряжений по дугам захвата и ширине очага деформации балки с горизонтальными и вертикальными валками. Приведены эпюры распределения разности скоростей металла балки и точек торцевой поверхности горизонтального валка в зоне их контакта. Определены причины и закономерности распределения нормальных и касательных напряжений в двух зонах очага деформации при прокатке широкополочной балки. Приведены результаты экспериментального исследования износа горизонтальных бандажированных валков универсально-балочного стана при прокатке широкополочных балок.

Ключевые слова: универсальная клеть, широкополочная балка, очаг деформации, бандажированный валок, нормальные и касательные напряжения, износ, скорость металла.

Введение

В результате интенсификации процесса прокатки, расширения сортамента широкополочных балок, использования непрерывнолитой заготовки и повышения требования к качеству строительных профилей основным условием эффективности универсально-балочного стана является улучшение качества валков и увеличение их стойкости. Особенности изнашивания валков в универсально-балочных станках состоит в том, что профиль проката формируется в двух зонах очага деформации: стенка балки – в горизонтальных валках, а полка – в горизонтальных и вертикальных валках. В очаге деформации происходит значительное рассогласование скоростей скольжения металла балки относительно торцевой цилиндрической поверхности бочки горизонтального валка, что приводит к неравномерному износу валков. Горизонтальные валки выходят из строя в основном из-за неравномерного износа их торцевых поверхностей. Известно [1–6], что качество прокатных валков в значительной мере определяет качество проката – требуемые потребительские его характеристики (точность размеров, качество поверхности) и конкурентоспособность. В связи с этим важно определить напряжённо-деформированное состояние металла в очагах деформации при прокатке широ-

кополочной балки в клетях универсально-балочного стана, что позволит определить течение металла, уровень нормальных и касательных напряжений и рассогласование скоростей металла и точек торцевой поверхности горизонтального валка, а следовательно, прогнозировать износ валков.

Методы исследования

Моделирование выполнялось в объёмной постановке с использованием программного продукта ANSYS [7]. Упор сделан на определение напряжённо-деформированного состояния и закономерности течения металла, возникающего в очаге деформации при прокатке балки 30Ш в горизонтальных и вертикальных валках универсальных клетей балочного стана Нижнетагильского металлургического комбината. Рассматривалась прокатка двутавровой заготовки длиной 30 м из стали 09Г2. Диаметры вертикальных и горизонтальных валков приняты равными 1500 и 1000 мм соответственно.

Принимаем, что вертикальные валки изготовлены из стали 60ХН. Горизонтальные валки являются бандажированными. Бандаж состоит из двух слоёв. Материал наружного бандажа – сталь 150ХНМ, внутреннего бандажа – сталь 100ХНМ. Двухслойный бандаж насажен на ось из стали 60ХН [1].

Материал балки в очаге деформации испы-

тывает упругопластические деформации, которые достигают конечных значений. Поскольку их уровень высок, то при описании модели материала балки в очаге деформации учтена не только физическая, но и геометрическая нелинейность. Для валков принимаем, что материал, из которого они изготовлены, подвержен только упругим деформациям и напряжениям, подчиняющимся закону Гука. В очагах деформации валков с балкой принимаем закон сухого трения Кулона.

Итак, при исследовании напряжённо-деформированного состояния двутавровой балки и валков при прокатке будем также пренебрегать инерционными и массовыми силами, деформируемый материал балки считать несжимаемым и изотропно упрочняющимся, а материал валков – подчиняющимся закону Гука. При записи уравнений состояния будем использовать случай простого нагружения.

В соответствии с принятыми допущениями и исходными данными рассчитаны значения сопротивления пластической деформации для стенки и полки балки, модуля упругости металла и коэффициента трения [1].

На **рис. 1** в системе координат XYZ представлена расчётная схема очага деформации при прокатке двутавровой балки. Валки на **рис. 1** не изображены. Цифрой I отмечена область контакта очага деформации балки с горизонтальным валком. Цифрой II отмечена область контакта очага деформации балки с вертикальным валком. Цифрой III отмечена часть поверхности контакта балки с торцевой поверхностью горизонтального валка. Для удобства представления результатов расчёта на поверхностях I, II, III изображена равномерная сетка линий.

Конечно-элементная модель балки и валков формировалась из трёхмерных 20 и узловых твёр-

дотельных элементов SOLID186 [1]. На поверхностях контакта валков с балкой размещены контактные элементы TARGE170 и CONTA174 [7]. Это элементы контакта типа «поверхность в поверхность» позволяют учесть большие деформации, переменность контактного взаимодействия (смыкания-размыкания) и Кулоново трение.

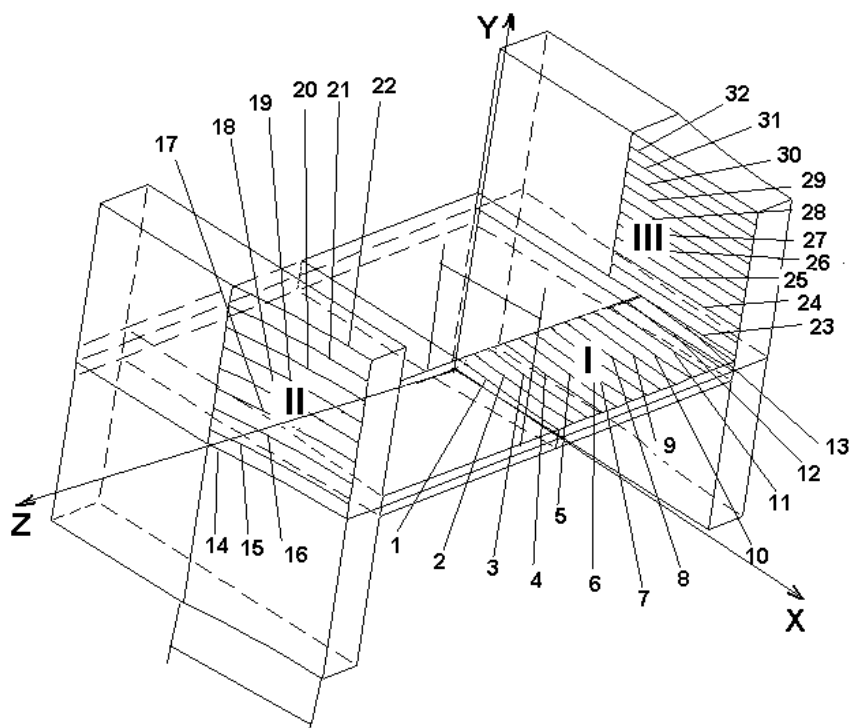


Рис. 1. Расчётная схема очага деформации при прокатке двутавровой балки

Результаты расчёта процесса прокатки представлены в виде эпюр распределения нормальных и касательных напряжений по дугам захвата и ширине очага деформации балки с горизонтальными и вертикальными валками. Также приведены эпюры распределения разности скоростей металла балки и точек торцевой поверхности горизонтального валка в зоне их контакта в направлении оси прокатки (OX).

Результаты расчёта этих параметров для прохода 3 в клети ГУК 1 приведены на **рис. 2–5**. Максимальные значения нормальных и касательных напряжений в очагах деформации балки с вертикальными и горизонтальными валками для прохода 5 в клети ГУК 1 и для прохода 7 в клети ГУК 2 даны в **таблице**.

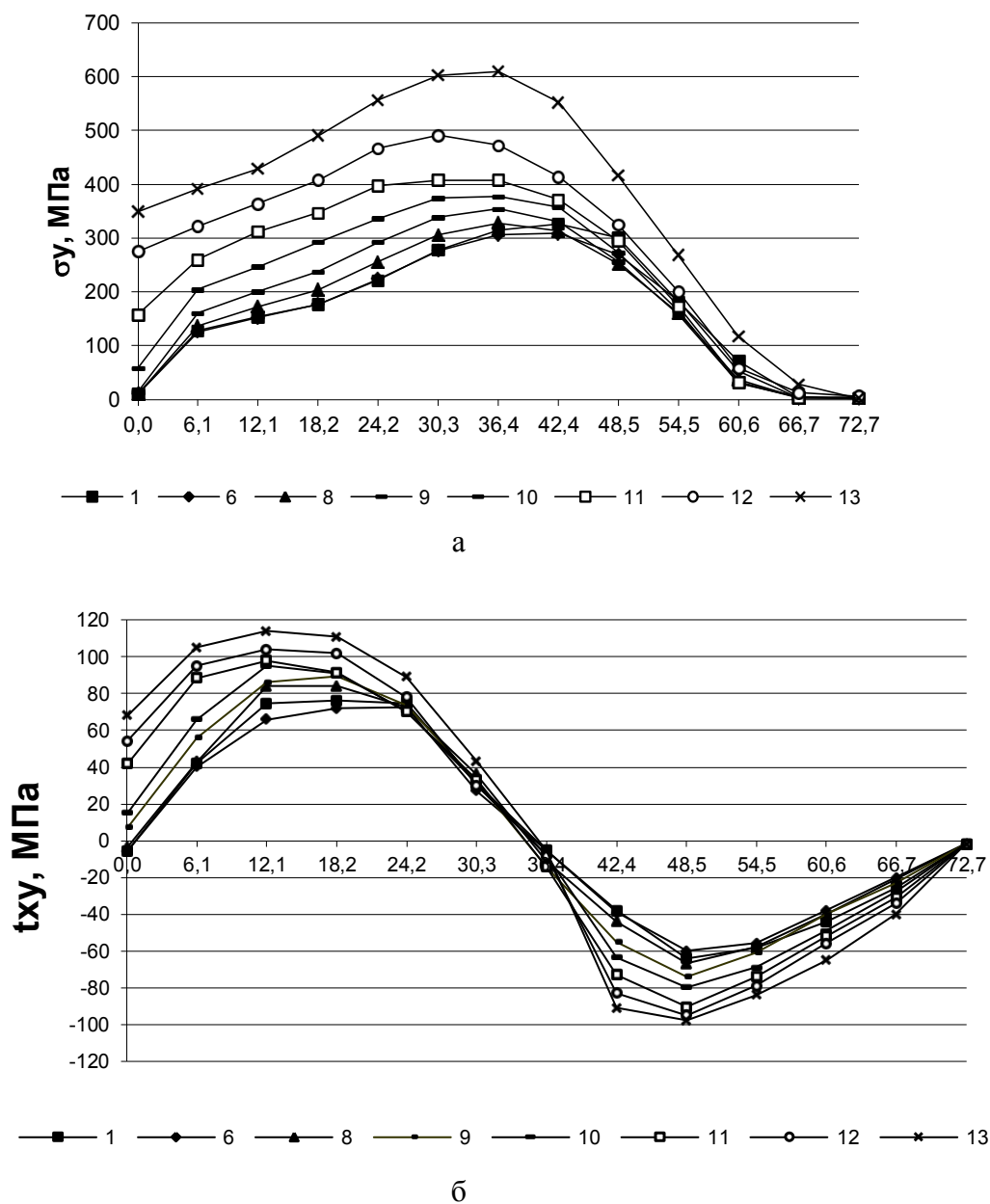
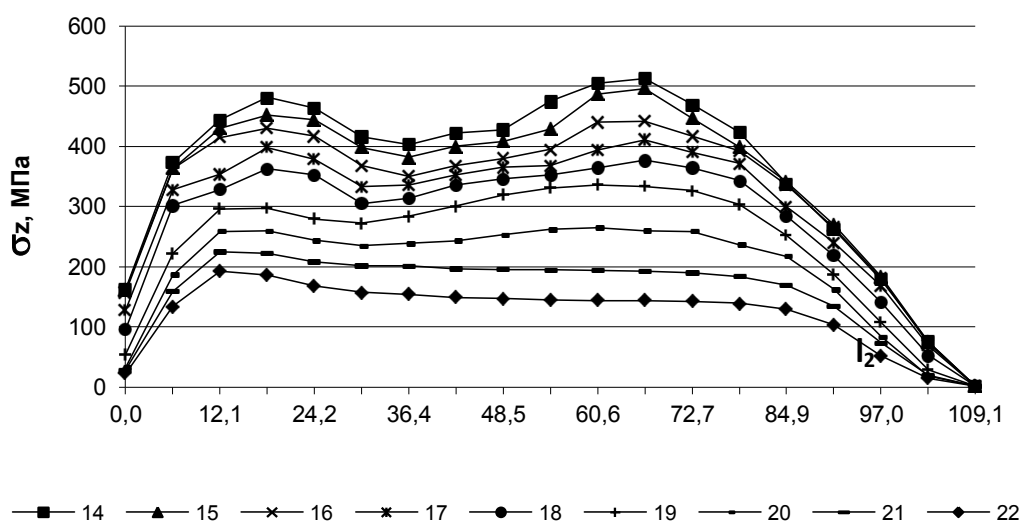


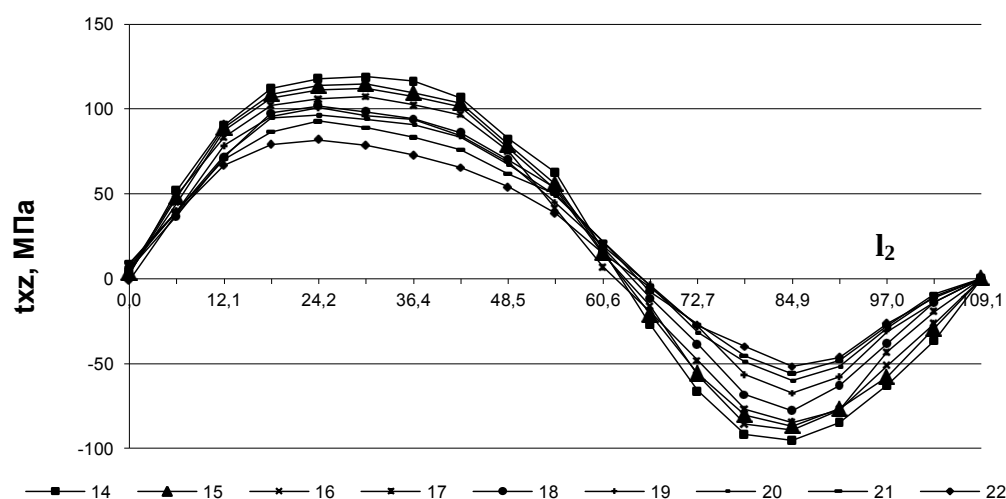
Рис. 2. Эпюра контактных нормальных (а) и касательных напряжений (б) по дуге захвата l_1 и ширине очага деформации балки с горизонтальным валком.

Расположение линий 1, 6–13 смотри на рис. 1.

Прокатка балки 30Ш в ГУК1 (проход 3). Температура прокатки 1040°C



а



б

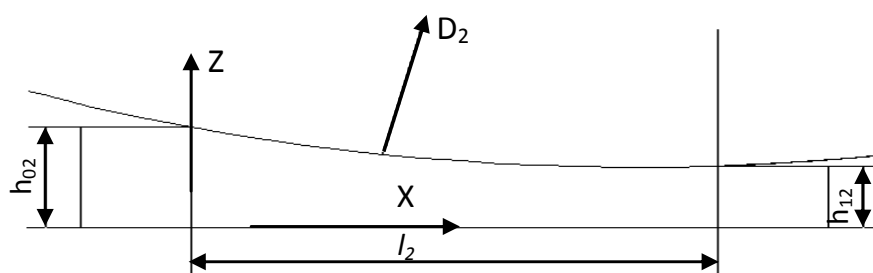
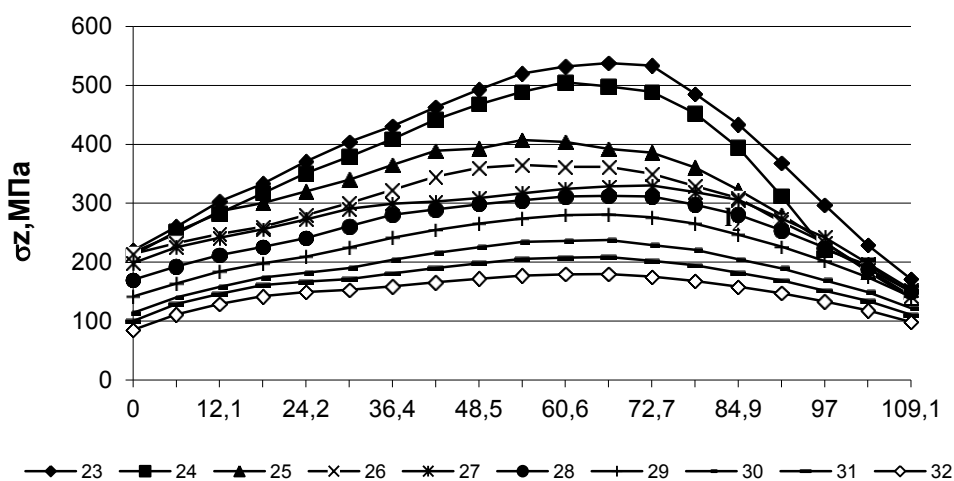


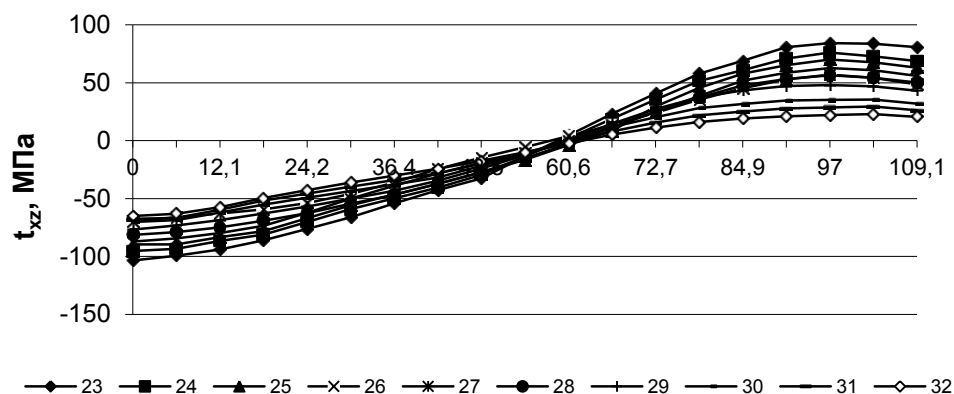
Рис. 3. Эпюра контактных нормальных (а) и касательных напряжений (б) по дуге захвата l_2 и ширине очага деформации балки с вертикальным валком.

Расположение линий 14–22 смотри на рис. 1.

Прокатка балки 30Ш в ГУК1 (проход 3). Температура прокатки 1040°C



а



б

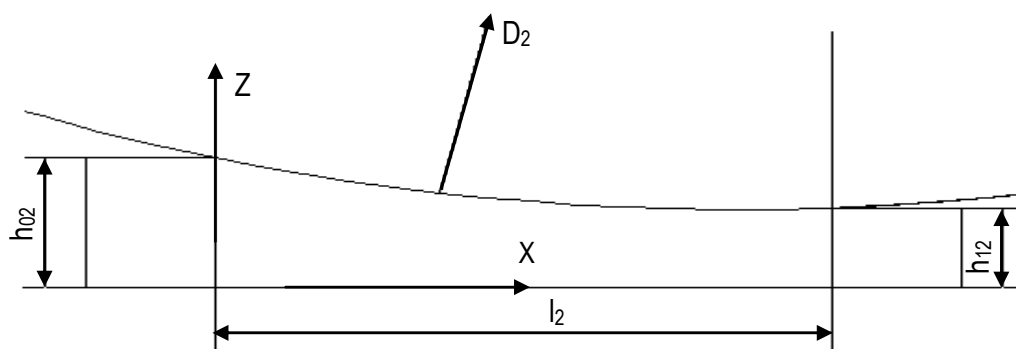


Рис. 4. Эпюра контактных нормальных (а) и касательных напряжений (б) в зоне контакта металла с торцевой поверхностью горизонтального валка (на длине дуги захвата l_2). Расположение линий 23–31 смотри на рис. 1. Прокатка балки 30Ш в ГУК1 (проход 3). Температура прокатки 1040°C

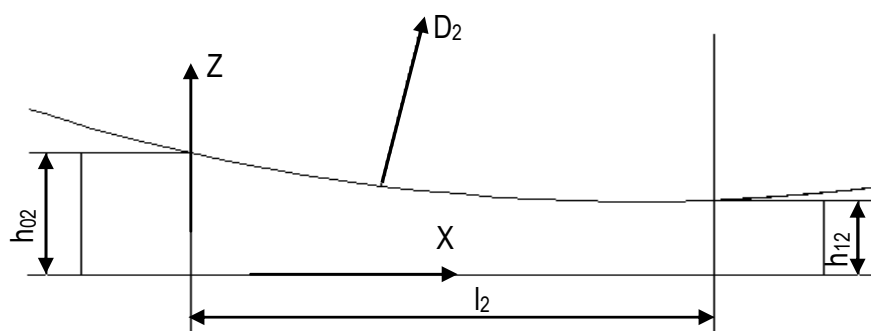
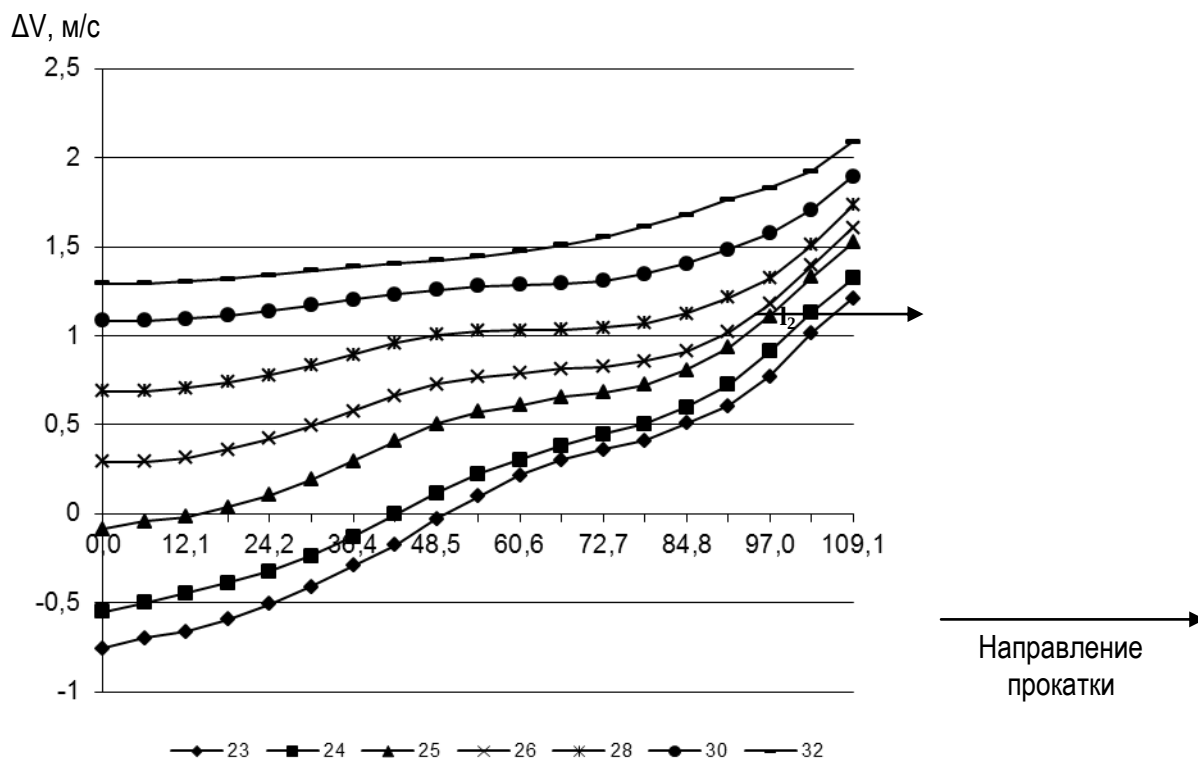


Рис. 5. Эпюры распределения разности скоростей металла и точек торцевой поверхности горизонтального вала в зоне контакта в направлении оси прокатки (OX).

Расположение линий 23–32 смотри на рис. 1.

Прокатка балки 30Ш в ГУК1 (проход 3). Температура прокатки 1040°C

Анализ расчётных данных показывает, что в очаге деформации двутавровой заготовки в горизонтальных и вертикальных валах универсальной клетки реализуется благоприятная с позиции качества проката схема напряжённого состояния с преобладанием высоких сжимающих напряжений (см. таблицу). Например, нормальные напряжения в очаге деформации горизонтальных валков σ_x при изменении температуры балки от 1040 до 700°C

возрастает от 610 до 862 МПа, а нормальные напряжения на контактной поверхности вертикального вала σ_z изменяются от 514 до 913 МПа. Высокие сжимающие напряжения имеют место в очаге деформации двутавровой заготовки и в направлении других осей координат. Такая схема напряжённого состояния в очаге деформации заготовки в универсальной клетки будет способствовать интенсивной проработке литого металла по всему

сечению балки с завариванием несплошностей и пор, предотвратит раскрытие поверхностных трещин, т.е. позволит получить балки высокого качества. Износ торцевой поверхности горизонтального валка, определяющий качество балок, зависит от величины касательных напряжений в зоне контакта боковой поверхности горизонтального валка с полкой балки.

Значения максимальных (контактных) нормальных и касательных напряжений в очагах деформации балки с вертикальным и горизонтальным валками

Номер вариан- та рас- чета	Клеть	Номер прохо- да	Нормальные и касательные напряжения в зоне контакта балки с валками							Т _м , °С
			горизон- тальным		горизонталь- ным (боковая поверхность)		вертикаль- ным			
			σ _x	t _{xy}	σ _z	t _{zx}	σ _z	t _{zx}		
			МПа							
1	ГУК1	3	610	114* -98	544	84 -104	514	119* -95	1040	
2		5	627	118 -101	550	86 -107	528	122 -98	980	
3	ГУК2	7	540	92 -93	640	101 -124	573	108 -102	900	
4			648	110 -112	770	120 -150	688	130 -118	800	
5			862	143 -150	1028	161 -197	913	171 -162	700	

* Положительные значения соответствуют зоне отставания, а отрицательные значения – зоне опережения в очаге деформации.

Величина этих напряжений существенно зависит от разности скоростей металла и точек торцевой поверхности горизонтального валка в зоне контакта и от температуры металла. Так, например, при снижении температуры металла с 1040 до 700°С величина касательных напряжений изменяется от 84 до 197 МПа, а нормальные напряжения σ_z при этом возрастают от 544 до 1028 МПа.

Графики изменения разности скоростей металла балки и точек торцевой поверхности горизонтального валка вдоль очага деформации l_2 показана на **рис. 5**. Наибольшая разность скоростей, равная 2,1 м/с, имеет место в наиболее удалённых от оси прокатки точках контакта полки двутавра с боковой поверхностью горизонтального валка. Графики (см. **рис. 4**) с учётом графиков (см. **рис. 5**) позволяет оценивать зависимость касательных напряжений от разности скоростей металла балки и точек торцевой поверхности горизонтального валка. Из этих графиков следует, что нет пропорциональной зависимости касательных напряжений от разности скоростей, однако при этом по высоте полки касательные

напряжения распределяются неравномерно и изменяются в диапазоне 25–100 МПа. Причём наибольшее значение касательных напряжений наблюдается в точках контакта торцевой поверхности горизонтального валка с полкой двутавра, расположенных вблизи стенки двутавра.

Опыт эксплуатации валков на универсально-балочном стане НТМК показал, что горизонтальные валки выходят из строя в основном из-за износа их торцевых поверхностей, неравномерность которого увеличивается по мере удаления от цилиндрической поверхности валка. Для изучения характера износа рабочих поверхностей бандажированных горизонтальных валков проведено специальное исследование [1]. Замеры износа валков проводились во второй универсальной клетке при прокатке балки 30К. Замеры износа горизонтальных валков проводились после того, как на универсально-балочном стане было прокатано 3120 т балок 30К. Характер износа горизонтального валка в ГУК 2 показан на **рис. 6**.

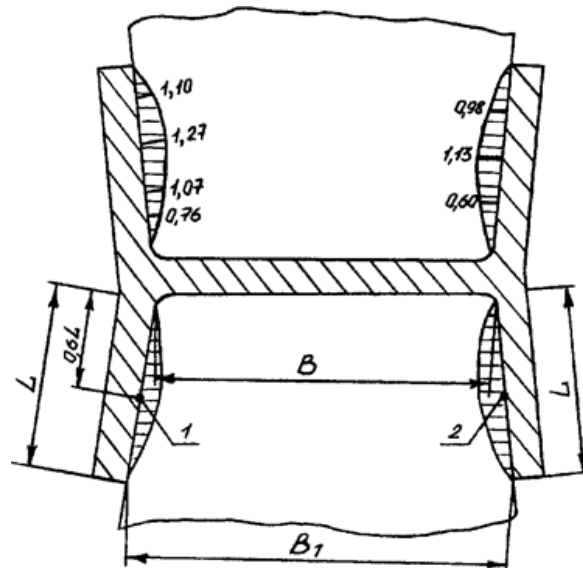


Рис. 6. Характер износа валков второй универсальной клетки УБС НТМК

Наибольший износ торцевой поверхности валка, равный 1,27 мм, наблюдается на расстоянии 0,65 длины полки двутавра от цилиндрической поверхности бочки валка. Это в какой-то степени подтверждает результаты теоретического исследования, поскольку в этой области величина касательных напряжений достигает 100 МПа, а разность скоростей металла балки и точек торцевой поверхности горизонтального валка в зоне контакта равна 1,5 м/с, что способствует высокому износу торцевой поверхности горизонтального валка.

Заключение

Проведено исследование напряжённо-деформированного состояния металла в двух зонах очага деформации и оценка износа горизонтальных валков при прокатке широкополочных балок на универсально-балочном стане. Установлено, что в зонах очага деформации двутавровой заготовки реализуется благоприятная с позиции качества проката схема напряжённого состояния с преобладанием высоких сжимающих напряжений. Износ торцевой поверхности горизонтального валка существенно зависит от разности скоростей металла и точек торцевой поверхности горизонтального валка в зоне контакта и от температуры металла. Экспериментальным путём определены закономерности и величина износа торцевой поверхности горизонтального валка.

Список литературы

1. Комратов Ю. С., Лехов О. С. Совершенствование производства проката в условиях НТМК // Банк культурной информации, 2002. 384 с.
2. Комратов Ю. С., Лехов О. С. Реконструкция и развитие сталеплавно-прокатного комплекса. Екатеринбург: Аква-пресс, 2001. 136 с.
3. Комратов Ю. С., Николаев В. А., Стариков В. В. Повышение стойкости валков универсально-балочных станов // Металлург. 1994. № 2. С. 30–32.
4. Комратов Ю. С., Лехов О. С. Повышение стойкости бандажированных валков универсально-балочного стана // Сталь. 2007. №11, С. 106–108.
5. Комратов Ю. С., Лехов О. С. О повышении стойкости бандажированных валков универсально-балочного стана // Производство проката. 2007. №10. С. 42–45.
6. Комратов Ю. С., Лехов О. С. Современный подход к реконструкции литейно-прокатного комплекса для производства широкополочных балок // Производство проката. 2009. №3. С.9–12.
7. ANSYS/ Structural Analysis Guide. Rel.6.0. <http://www.cadfern.ru>

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

STUDY OF STRESSES IN DEFORMATION AREAS AND EVALUATION OF WEAR OF ROLLS OF UNIVERSAL STANDS, WHEN ROLLING WIDE-FLANGE BEAMS

Lekhov Oleg Stepanovich – D.Sc. (Eng.), Professor, Russian State Vocational Pedagogical University, Yekaterinburg, Russia. Phone: +7 343 341 79 40.

Tuev Mikhail Yurievich – Associate Professor, Russian State Vocational Pedagogical University, Yekaterinburg, Russia. Phone: +7 343 370 24 93.

Abstract. This paper examines special features of wear of rolls of universal stands, when rolling wide-flange beams. A stress and strain state of metal in two deformation zones, when shaping beam walls and flanges was studied. The results of calculating a rolling process are represented in diagrams of the distribution of normal and tangential stresses along arcs of contact and width of a beam deformation zone with horizontal and edging rolls. The paper contains diagrams of the distribution of a difference in speeds of metal of beams and points of a butt end of a horizontal roll in a zone of their contact. Reasons and laws governing the distribution of normal and tangential stresses in two deformation zones, when rolling wide-flange beams, were determined. Results of an experimental study of wear of horizontal composite rolls of a universal beam mill, when rolling wide-flange beams, are given.

Keywords: Universal stand, wide-flange beam, deformation zone, composite roll, normal and tangential stresses, wear, speed of metal.

References

1. Komratov Yu. S., Lekhov O. S. Improving rolling at NTMK. *Bank kul'turnoj informatsii*. [Bank of cultural information]. 2002, 384 p.
2. Komratov Yu. S., Lekhov O. S. *Rekonstruktsiya i razvitiye staleplavil'no-prokatnogo kompleksa*. [Reconstruction and development of a steelmaking and rolling complex]. Yekaterinburg: Akva-press, 2001, 136 p.
3. Komratov Yu. S., Nikolaev V. A., Starikov V. V. Increase in the durability of rolls of universal beam mills. *Metallurg*. [Metallurgist]. 1994, no. 2, pp. 30–32.
4. Komratov Yu. S., Lekhov O. S. Increase in the durability of composite rolls of a universal beam mill. *Stal'*. [Steel]. 2007, no. 11, pp. 106–108.
5. Komratov Yu. S., Lekhov O. S. On an increase in the durability of composite rolls of a universal beam mill. *Proizvodstvo prokata*. [Rolling facilities]. 2007, no. 10, pp. 42–45.
6. Komratov Yu. S., Lekhov O. S. A contemporary approach to reconstruction of a compact strip production complex for wide-flange beams. *Proizvodstvo prokata*. [Rolling facilities]. 2009, no. 3, pp.9–12.
7. ANSYS/ Structural Analysis Guide. Rel.6.0. <http://www.cadfern.ru>

Лехов О.С., Туев М.Ю. Исследование напряжений в очагах деформации и оценка износа валков универсальных клетей при прокатке широкополочных балок // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №2. С. 37–44.

Lekhov O.S., Tuev M.Yu. Study of stresses in deformation areas and evaluation of wear of rolls of universal stands, when rolling wide-flange beams. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 2, pp. 37–44.

УДК 621.774.6

ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ГИБКЕ ТРУБ С ОБКАТЫВАНИЕМ, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОДУЛЯ И ПК

Миронов К.А.¹, Козлов А.В.², Шеркунов В.Г.¹, Суворов А.Л.²¹ Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск, Россия² Филиал Южно-Уральского государственного университета (НИУ), Златоуст, Россия

Аннотация. В работе приведены результаты исследований технологии холодной гибки труб с обкатыванием. Разработано приспособление для измерения усилия гибки. С использованием разработанной лабораторной установки и автоматизированного модуля экспериментально определены зависимости изгибающих усилий от технологических режимов гибки.

Ключевые слова: гибка труб; экспериментальные исследования; автоматизированный модуль; лабораторная установка, изгибающие усилия.

Введение

Гибка труб – основная операция технологического процесса изготовления криволинейных деталей трубопроводов. В современных промышленных условиях очень сложно произвести качественную холодную гибку труб диаметром более 60 мм. В Южно-Уральском государственном университете на кафедре технологии машиностроения, станков и инструментов разработана технология холодной гибки труб с обкатыванием. Применение такой технологии позволяет в 2–3 раза снизить усилиягиба, а также полностью исключить сплющивание и уменьшить гофрообразование. Новая технология позволяет сохранять различные виды покрытий, нанесенные на внутреннюю поверхность трубы (рис. 1).

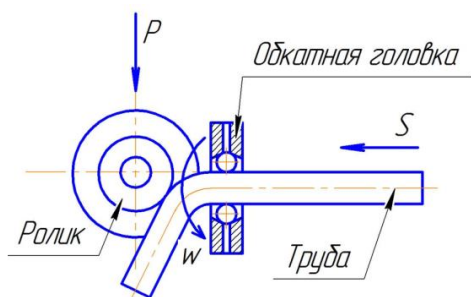


Рис. 1. Схема гибки труб с обкатыванием

В основе данной технологии лежит создание в изгибаемой трубе перемещающейся пластической зоны, в каждой точке которой под воздействием сосредоточенных радиальных сил возникают знакопеременные изгибные напряжения стенок трубы. Схема деформации трубы при ее

обкатывании по наружной поверхности представлена на рис. 2 [1–3].

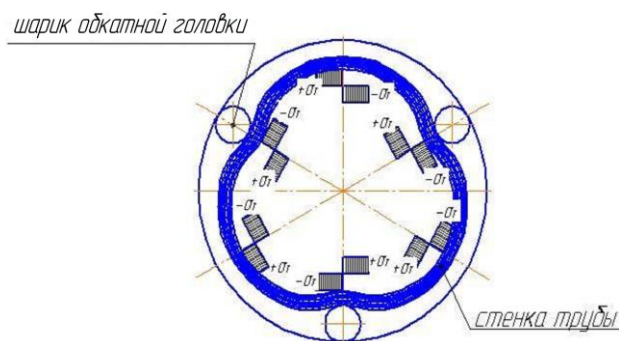


Рис. 2. Схема деформации трубы при обкатывании

Материалы и методы исследования

На начальном этапе исследования теоретически было рассчитано усилие, необходимое для гибки труб без использования обкатного инструмента. Расчеты были произведены на основе известных зависимостей из условия прочности материала трубы [4]. Установлено, что изгиб трубы Ø 60 мм с толщиной стенки 3 мм из стали 20 (ГОСТ 1050-88) начинается при воздействии на неё поперечной силы, равной $P = 23000$ Н.

Для получения экспериментальных данных об усилиях гибки при различных режимах была спроектирована лабораторная установка. Кинематическая схема лабораторной установки показана на рис. 3. Вращение от двигателя б через ремённую передачу сообщается червяку 7, червяк, в свою очередь, передает вращение

на червячное колесо, соединенное с цепной передачей 8, которая вращает ходовой винт подачи трубы 9. Главное движение от электродвигателя 5 передается на обкатную головку 1. При помощи прижимного ролика 3 происходит фиксация трубы в направляющей 2 и создается изгибающее усилие. Труба 4 устанавливается в обкатную головку 1, до упора в подающий винт 9. В прижимной механизм был установлен серийный динамометр сжатия модели ДС-3. Разработано приспособление для крепления динамометра на установке (рис. 4).

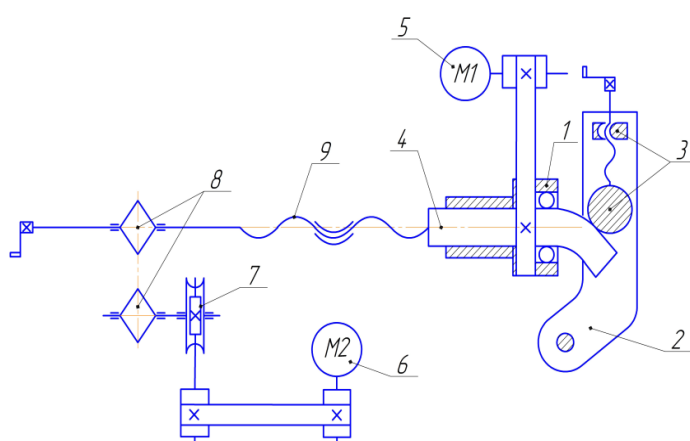


Рис. 3. Кинематическая схема лабораторной установки

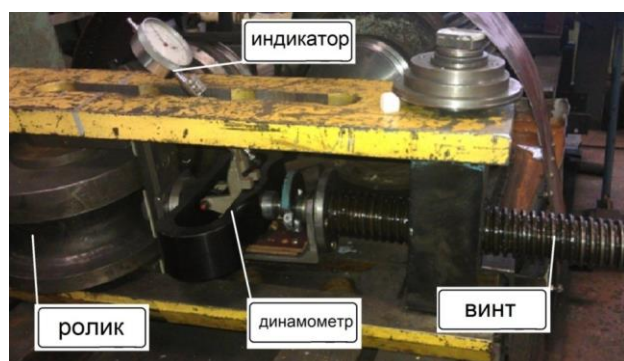


Рис. 4. Динамометр на прижимном ролике

После проведения предварительных экспериментов был выявлен ряд недостатков, в частности отсутствие автоматической записи результатов измерений. Применение автоматизированного устройства регистрации усилия позволило бы решить данную проблему, а также повысить точность измерения.

При разработке автоматизированного модуля были рассмотрены основные аналоги и виды

датчиков, которые в них используются. В предлагаемом устройстве за основу были взяты тензометрические резисторы КФ5П1-10-200, подключенные по схеме «4 активных тензорезистора». Данная схема подключения применима для измерения деформации изгиба. Она термокомпенсирована и исключает температурную погрешность кабеля.

Датчики 2 установлены на скобу динамометра 1 (рис. 5) с использованием клея марки БФ-6. Функциональная схема автоматизированного модуля представлена на рис. 6.

В одну диагональ мостовой схемы подается переменное напряжение номиналом 7,5 В. С другой диагонали моста снимается выходное напряжение (сигнал), зависящее от степени деформации скобы, с наклеенными на нее тензорезисторами. Так как выходной сигнал очень маленький (десятые доли милливольт), в схему встроены операционный усилитель с коэффициентом усиления $K=100$. Далее выходной сигнал подается на линейный вход звуковой платы персонального компьютера. Для стабилизации напряжения в сети используется стабилизатор напряжения модели UPOWER ACH-500 с цифровым дисплеем.

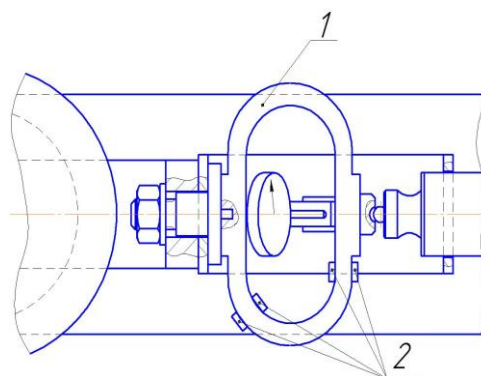


Рис. 5. Схема крепления датчиков

Регистрация изменения выходного сигнала производится с помощью программного обеспечения Power Graph 2.2. Данная программа имеет функцию осциллографа-самописца и позволяет записывать изменения входного сигнала с интервалом до 0,2 с.

При помощи индикатора часового типа и автоматизированного модуля был построен тарировочный график (рис. 7).

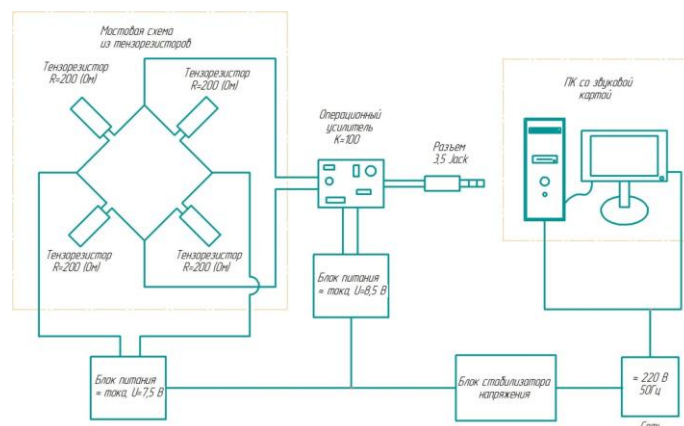


Рис. 6. Функциональная схема автоматизированного модуля

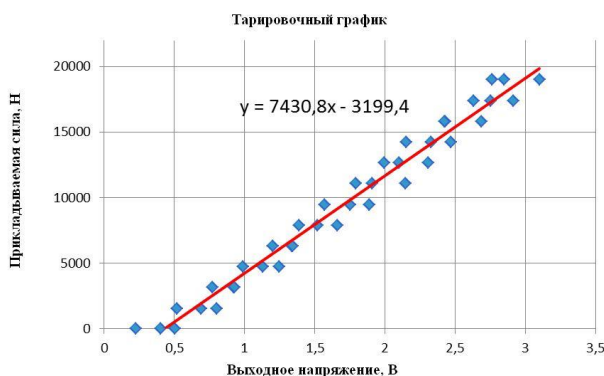


Рис. 7. График зависимости силы, прикладываемой при гибке труб, от выходного напряжения устройства

После установки автоматизированного модуля была проведена серия экспериментов с обкатыванием изгибаемой трубы на различных режимах гибки, главными из которых являются натяг, создаваемый обкатной головкой, и скорость продольной подачи трубы.

В качестве образцов для проведения эксперимента были использованы трубы из стали 20. Геометрические параметры образцов: длина – 1200 мм; диаметр – 60 мм; толщина стенки – 3 мм.

Результаты измерений представлены в таблице и в графическом виде на рис. 8, 9.

Результаты проведения эксперимента

Натяг, мм	Подача, мм/мин	Усилие гибки в установившемся режиме, Н
0,5	50	13500
	60	14200
	70	16500
0,8	50	9400
	60	9600
	70	10100
1	50	9500
	60	9800
	70	10100
1,2	50	9900
	60	10200
	70	11000
1,5	50	10200
	60	10700
	70	11700

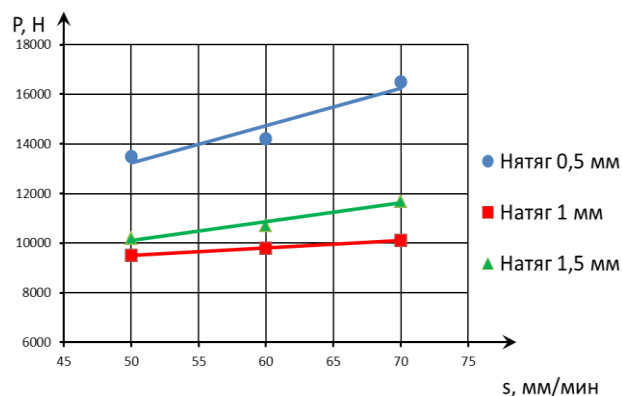


Рис. 8. График зависимости усилия от подачи в установившемся режиме гибки

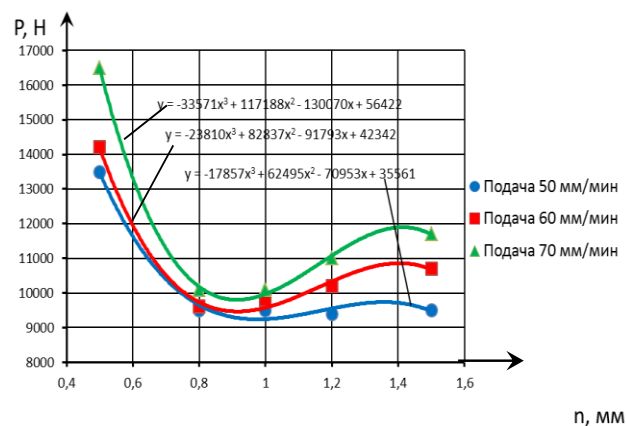


Рис. 9. График зависимости усилия от натяга в установившемся режиме гибки

При проведении серии экспериментов запись показаний производилась с двух приборов: динамометра сжатия, расположенного на установке, и разработанного автоматизированного модуля. После обработки результатов было установлено, что средняя ошибка регистраций показаний с устройства не превышает 2%.

Выводы

Проанализировав полученные данные, можно сделать следующие выводы:

1) усилие гибки при воздействии на трубу обкатного инструмента в 1,3–2,4 раза (в зависимости от режима работы установки) ниже, чем усилие гибки без использования обкатного инструмента;

2) наименьшее усилие гибки достигалось при минимальном значении продольной подачи;

3) при увеличении натяга свыше 1 мм происходит резкое увеличение усилия, которое можно объяснить образованием наплыва (заусенца) на наружной поверхности.

Список литературы

1. Козлов А.В., Бобылев А.В. Технология и оборудование холодной гибки тонкостенных труб: монография. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007.
2. Козлов А.В., Лакирев С.Г., Хилькевич Я.М. Новая технология гибки труб // Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки. Челябинск: ЧГТУ, 1993.
3. Козлов А.В., Дерябин И.П. Холодная гибка с воздействием на изгибаемую трубу вращающимся раскатником-обкатником // Надежность и качество в промышленности, энергетике и на транспорте: труды междунар. конф. Самара: СамГТУ, 1999. Ч. 1.
4. Беляев Н.М. Сопротивление материалов. М.: Наука, 1976.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

THE STUDY OF POWER CHARACTERISTICS DURING PIPE BENDING WITH BURNISHING, USING AN AUTOMATED MODULE AND A PC

Mironov Kirill Andreevich – Postgraduate Student, South Ural State University (NRU), Chelyabinsk, Russia. E-mail: mironovkir@yandex.ru.

Kozlov Alexander Vasilievich – D.Sc. (Eng.), Professor, the Zlatoust branch of the South Ural State University (NRU), Zlatoust, Russia. E-mail: a_kozlov55@mail.ru.

Sherkunov Viktor Georgievich – D.Sc. (Eng.), Professor, South Ural State University (NRU), Chelyabinsk, Russia. E-mail: sherkunovvg@susu.ac.ru.

Suvorov Andrey Leonidovich – Student, the Zlatoust branch of the South Ural State University (NRU), Zlatoust, Russia. E-mail: als_2991@mail.ru.

Abstract. This paper contains studies of pipe cold bending with burnishing. A bending force measuring device was developed. The developed laboratory facility and automated module were used to experimentally determine dependences between bending forces and bending technological modes.

Keywords: Pipe bending, experimental research, automated module, laboratory facility, bending forces.

References

1. Kozlov A.V., Bobylev A.V. *Tekhnologiya i oborudovanie kholodnoy gibki tonkostennykh trub: monografiya* [Technology and equipment for cold bending of thin-walled pipes: a monograph]. Chelyabinsk: Publishing house of SUSU, 2007.
2. Kozlov A.V., Lakirev S.G., Khilkevich Ya.M. A new technology of bending pipes. *Progressivnaya tekhnologiya chistovoy i otdelochnoy obrabotki* [An advanced technology of finishing treatment]. Chelyabinsk: CSTU, 1993.
3. Kozlov A.V., Deryabin I.P. Cold bending, including treatment of pipes with a rotating burnisher. *Nadezhnost' i kachestvo v promyshlennosti, ehnergetike i na transporte: trudy mezhdunarodnoy konferentsii* [Reliability and quality in industry, power engineering and transport: proceedings of the international conference]. Samara: Samara State Technical University, 1999, part 1.
4. Belyaev N.M. *Soprotivlenie materialov* [Strength of materials]. Moscow: Nauka, 1976.

Исследование силовых характеристик при гибке труб с обкатыванием, с использованием автоматизированного модуля и ПК / Миронов К.А., Козлов А.В., Шеркунов В.Г., Суворов А.Л. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №2. С. 45–48.

Mironov K.A., Kozlov A.V., Sherkunov V.G., Suvorov A.L. The study of power characteristics during pipe bending with burnishing, using an automated module and a PC. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 2, pp. 45–48.

УДК 621.9.011: 621.9.019

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ОДНООСНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО СТЕРЖНЯ

Трофимов В.Н., Карманов В.В., Панин Ю.В., Корионов М.А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

Аннотация. В статье рассмотрена возможность применения теоремы о разгрузке для определения остаточных макронапряжений при пластической деформации цилиндрического стержня. С использованием метода рентгеновской дифрактометрии экспериментально определены остаточные напряжения на поверхности стержня. Результаты

эксперимента использованы для теоретического расчёта остаточных напряжений. Сделаны выводы о возможности применения теоремы о разгрузке для теоретического определения остаточных напряжений.

Ключевые слова: остаточные напряжения, рентгеновская дифрактометрия, теорема о разгрузке.

Введение

Повышение надежности изделий машиностроения требует учёта всё большего количества параметров, оказывающих влияние на их эксплуатационные характеристики. Одним из таких параметров является уровень остаточных напряжений 1 рода (по классификации Давиденкова Н.Н. [1], далее RS_1 – residual stresses 1 mode).

Экспериментальные методы определения RS_1 весьма трудоёмкие и чаще всего являются разрушающими методами [2]. Поэтому большой интерес представляют теоретические методы, которые основаны на анализе уравнений равновесия или на эквивалентных вариационных принципах.

В то же время интенсивное развитие техники для неразрушающего контроля механических характеристик металлов позволяет провести экспериментальную оценку теоретических положений, используемых для расчёта RS_1 .

Теоретическая часть

Рассмотрим некоторые теоретические методы и результаты их применения для определения RS_1 .

Одним из первых методов, позволяющих вычислять остаточные напряжения, была теорема о разгрузке [3]. Для вычисления RS_1 необходимо к напряжениям, которые имелись в теле при пластической деформации перед разгрузкой, прибавить в алгебраическом смысле напряжения, которые были бы в теле под действием внешней нагрузки противоположного знака, но в предположении упругих свойств тела. Существование достаточно большого количества методов решения упругопластических задач определили распространённость применения теоремы о разгрузке. Теорема о разгрузке справедлива тогда, когда процесс нагружения является простым и не возникают вторичные пластические деформации.

Для определения поля остаточных напряжений может быть использован функционал, предложенный Койтером В.Т. [4]:

$$I = \frac{1}{2} \cdot \int_V A_{ijkl} \sigma_{ij} \sigma_{kl} dV + \int_V \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} dV, \quad (1)$$

где A_{ijkl} – матрица упругих констант материала;

σ_{ij} – виртуальные остаточные напряжения; V – объём деформируемого тела; ε_{ij} – компоненты тензора пластических деформаций.

При использовании функционала (1) пластическое течение металла предполагается изотермическим. Если упругие константы материала в процессе деформации не изменяются и деформированный материал остаётся изотропным, то вариационный принцип эквивалентен теореме о разгрузке для идеального упругопластического материала.

В работе [5] доказана теорема, определяющая условие возникновения остаточных напряжений, и показано, что действительное поле остаточных напряжений сообщает минимум функционалу:

$$\Phi(\rho_{ij}^*) = \int_V \left(\frac{1}{2} C_{ijkl}^{-1} \rho_{ij}^* \rho_{kl}^* + \rho_{ij}^* \eta_{ij}^p + \rho_{ij}^* \eta_{ij}^T \right) dV, \quad (2)$$

где C_{ijkl}^{-1} – матрица упругих констант материала;

ρ_{ij}^* – виртуальные остаточные напряжения,

η_{ij}^p, η_{ij}^T – компоненты тензора пластической и температурной деформации.

Решения с использованием функционалов (1) и (2) предполагают применение соотношений механики континуальных сред. В реальных металлах существуют разрывы, связанные с наличием структурных дефектов – дислокациям и их скоплениям, субмикро- и микротрещинами, что ведёт к накоплению латентной энергии. Поэтому авторы работы [6] использовали энергетический подход для определения величины RS_1 , принимаемая ряд условий:

– условие эквивалентности латентной энергии и энергии остаточных напряжений $U_{ост}$;

– энергия остаточных напряжений $U_{ост}$ составляет часть энергии пластической деформации $U_{пл}$

$$U_{ост} = \psi \cdot U_{пл}; \quad (3)$$

– предварительно задана зависимость расщепления RS_1 по сечению изделия в виде степенного ряда;

– деформируемый материал до и после деформации изотропный.

Используя соотношения теории упругости,

авторы работы [6] предложили методику определения компонентов тензора остаточных напряжений в осесимметричных телах.

Авторы работы [6] принимали $\psi = \text{const}$. Тогда, в соответствии с формулой (3), с ростом $U_{пл}$ должна возрастать и величина $U_{ост}$, что не всегда соответствует экспериментальным данным. Коэффициент ψ должен быть функцией, определяемой условиями деформирования, например интенсивностью деформации ε_i , которая неоднородна по сечению деформируемого тела. Поэтому для его определения необходимо иметь достаточную экспериментальную базу данных, что в настоящее время отсутствует. Также отметим, что при использовании формулы (3) сложно выделить долю, определяющую энергию RS_1 .

Приведенный краткий обзор позволяет сделать следующий вывод о том, что для расчёта RS_1 может быть использована теорема о разгрузке при соблюдении ряда условий:

- нагружение является простым;
- разгрузка происходит одновременно во всех точках сечения образца;
- отсутствуют вторичные пластические деформации;
- отсутствуют температурные деформации.

Такие условия реализуются при проведении стандартных статических испытаний на одноосное растяжение при комнатной температуре.

В данной статье предпринята попытка оценки возможности применения теоремы о разгрузке при одноосной пластической деформации путём сравнения расчётных и экспериментальных значений RS_1 , возникающих в сечении цилиндрического образца при одноосном растяжении.

В соответствии с теоремой о разгрузке для определения RS_1 необходимо иметь решение пластической и упругой задачи о растяжении образца.

При однородной пластической деформации цилиндрического образца осевые напряжения определяются по формуле $\sigma_z = P/F$ (P – действующая нагрузка, F – площадь поперечного сечения образца), а радиальные σ_r и окружные σ_φ напряжения равны нулю.

По окончании однородной деформации (при достижении предела прочности σ_B) образуется шейка (рис. 1), в области которой напряженно-деформированное состояние неоднородное.

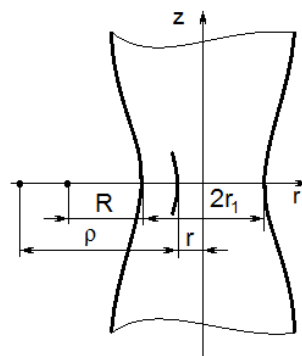


Рис. 1. Схема шейки образца

Существует ряд решений для определения компонентов тензора напряжений в наименьшем сечении шейки пластически деформированного цилиндрического стержня – Давиденкова Н.Н. и Спиридоновой Н.И. [1], Бриджмена П. [7], Остеева А.А. [8].

В данной статье для определения компонентов тензора напряжений в шейке при пластической деформации цилиндрического образца использовано решение [1], которое имеет вид

$$\sigma_z = \sigma_i \left(1 + \frac{r_1^2 - r^2}{2r_1 R} \right); \quad \sigma_r = \sigma_\theta = \sigma_i \frac{r_1^2 - r^2}{2r_1 R}; \quad (4)$$

$$\bar{\sigma}_z = \sigma_i \left(1 + \frac{r_1}{4R} \right); \quad \bar{\sigma}_z = P / \pi r_1^2,$$

где σ_z , σ_θ , σ_r – осевое, окружное и радиальное напряжения соответственно; σ_i – интенсивность напряжений; $\bar{\sigma}_z$ – усредненное по сечению образца осевое напряжение; r_1 – радиус сечения шейки; R – радиус кривизны ее контура в меридиональном сечении.

Из формул (4) следует, что на поверхности образца радиальные и окружные напряжения равны нулю.

Для определения компонентов тензора напряжений при упругой деформации используется решение Г. Нейбера [9].

Предполагая, что в наименьшем сечении образующая профиля шейки имеет форму близкую к гиперболе, Г. Нейбер получил соотношения для определения компонентов тензора напряжений

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= \frac{B - \alpha C}{\cos \beta} + \frac{B - A}{\cos^3 \beta}; \\ \sigma_r &= -\frac{A}{\cos \beta (1 + \cos \beta)} + \frac{A - B}{\cos^3 \beta} + \frac{(\alpha - 2) C}{\cos \beta}; \\ \sigma_\varphi &= \frac{A}{\cos \beta (1 + \cos \beta)} + \frac{(\alpha - 2) C - B}{\cos \beta}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где $A = (\alpha - 1)(1 + \cos \beta_0) C$; $C = -\frac{P}{2} \cdot \frac{1 + \cos \beta_0}{1 + (2 - \alpha) \cos \beta_0 + \cos^2 \beta_0}$; $\alpha = 2(1 - \mu)$; $B = A - C \cos^2 \beta_0$;

$$\cos \beta_0 = \sqrt{\frac{1}{\frac{r_1}{R} + 1}}; \cos \beta = \sqrt{1 - \left(\frac{r}{r_1} \sin \beta_0\right)^2}; \sin \beta_0 = \sqrt{\frac{\frac{r_1}{R}}{\frac{r_1}{R} + 1}}; P - \text{усилие нагружения образца};$$

μ – коэффициент Пуассона.

Экспериментальная часть

Для проведения эксперимента использовались полированные цилиндрические образцы из стали 45. Измерение RS_1 проводилось рентгеновским методом с использованием роботизированного измерительного комплекса XSTRESS. На рис. 2 приведена схема измерений.

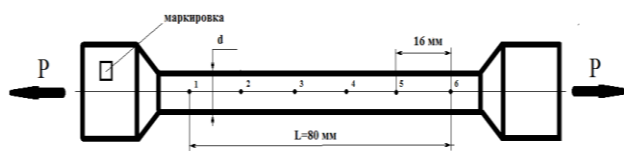


Рис. 2. Схема контрольных точек для измерения RS_1

Так как место начала образования шейки образца предварительно неизвестно, то определение RS_1 проводилось в точках 1-6. После образования шейки величина RS_1 определялась в наименьшем сечении шейки и в ближайших точках с обеих сторон шейки.

Нагружение образцов проводилось последовательно в несколько этапов:

Этап 1. Однородная пластическая деформация без образования шейки ($\sigma_z < \sigma_B$).

Этап 2. Пластическая деформация с локализацией в области шейки ($\sigma_z > \sigma_B$).

Этап 3. Пластическая деформация до момента, близкого к разрушению образца.

Последовательность этапов деформирования контролировалась по виду диаграммы растяжения. По окончании каждого этапа деформирования определялись геометрические параметры шейки.

На рис. 3 приведена схема определения геометрических параметров шейки, необходимых для расчёта RS_1 . Определение производилось путем импорта фотографии шейки в среду графического редактора КОМПАС 2D/3D и обработки увеличенного изображения в следующей последовательности:

– по замеренному действительному диаметру шейки образца $d_{ш}$ и размеру шейки d_1 на фото-

графии (см. рис. 3) определялся коэффициент масштабирования – $\mu = d_{ш} / d_1$;

– по трем точкам на контуре шейки определялся радиус R_1 окружности, наиболее прилегающей к контуру шейки;

– определялась действительная величина радиуса прилегающей окружности в наименьшем сечении шейки – $R = \mu \cdot R_1$.

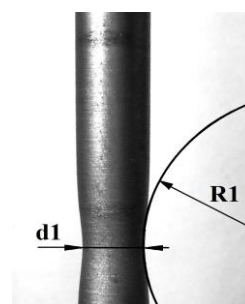


Рис. 3. Схема определения геометрических параметров шейки образца

Результаты расчёта и эксперимента

При проведении эксперимента использовались 3 образца. Результаты приведены в табл. 1–3 (индексы: 0 – недеформированный образец; 1-3 – этапы деформирования).

Таблица 1

Размеры сечений образцов

Номер образца	До деформирования		Этап 1		Этап 2		Этап 3	
	d_0 , мм	F_0 , мм ²	d_1 , мм	F_1 , мм ²	d_2 , мм	F_2 , мм ²	d_3 , мм	F_3 , мм ²
1	9,8	75,39	9,5	70,85	7,5	44,18	7,2	40,72
2	9,8	75,39	9,2	66,44	6,8	36,32	6,5	33,18
3	9,8	75,39	9,1	65,01	7,3	41,85	7,1	39,59

Таблица 2

Осевые напряжения в сечении образцов

Номер образца	Этап 1		Этап 2		Этап 3	
	P, кгс	$\bar{\sigma}_z$	P, кгс	$\bar{\sigma}_z$	P, кгс	$\bar{\sigma}_z$
1	2480	343,2	3190	708,3	2900	698,7
2	2730	402,9	2880	778,0	2510	742,0
3	2750	414,8	2990	700,8	2670	661,6

Таблица 3

Результаты измерения осевых RS_1
в контрольных точках

Номер образца	Этап	RS_1 , МПа						Шейка
		1	2	3	4	5	6	
1	недеф.	–	–391,1	–402,1	–361,4	–390,3	–	–393,7
	1	–	199,2	206,1	232,3	228,5	–	216,5
	2	–	55,4	54,7	64,7	64,1	–	–94,3
	3	–	–118,2	50,3	–	–	–	–129,3
2	недеф.	–	–352,6	–296,2	–351,0	–270,8	–	–317,7
	1	–	139,5	122,5	146,6	146,0	–	138,7
	2	–	90,8	48,5	65,6	72,9	–	–92,5
	3	26,1	82,9	–	–	–	–	–108,3
3	недеф.	–	–337,2	–328,2	–370,5	–383,8	–	–354,9
	1	–	115,9	128,3	146,8	156,7	–	136,9
	2	–	33,0	43,9	38,3	65,2	–	–115,4
	3	61,2	41,5	–	–	–	–	–129,7

Примечание. Для недеформированных и однородно деформированных образцов (1 этап) определялось среднее значение остаточных напряжений по измерениям в точках 2-5.

Таблица 4

Геометрические параметры шейки образцов

Номер образца	d_w , мм	d_1 , мм	$\mu = d_w / d_1$	R_1 , мм	R , мм
2 этап					
1	7,5	63,25	0,118	209,24	24,69
2	6,8	54,73	0,124	135,52	16,81
3	7,3	44,94	0,162	143,39	23,23
3 этап					
1	7,2	43,58	0,165	117,56	19,39
2	6,5	56,70	0,114	127,12	14,57
3	7,1	62,29	0,116	166,81	19,28

Таблица 5

Расчётные значения RS_1

Номер образца	Метод расчёта	1 этап*	2 этап	3 этап
1	[7]	343,2	0	682,1
	[9]	–	–	754,9
	RS_1	–	–	–72,8
2	[7]	402,9	0	740,1
	[9]	–	–	845,7
	RS_1	–	–	–105,6
3	[7]	414,8	0	674,0
	[9]	–	–	748,4
	RS_1	–	–	–74,4

* Напряжения определялись по формуле $\sigma_i = P/F_1$.

Анализ результатов и выводы по работе

Отметим полученные результаты.

1. В исходном состоянии после полирования на поверхности всех образцов наблюдаются сжимающие осевые остаточные напряжения, обусловленные финишной технологической операцией при их изготовлении.

2. После однородной пластической деформации (этап 1) остаточные напряжения на поверхности растягивающие. В соответствии с теоремой о разгрузке остаточные напряжения должны отсутствовать.

3. После второго и третьего этапов нагружения экспериментальные и расчётные значения остаточных напряжений возрастают по модулю. При этом экспериментальные значения остаточных напряжений имеют больший модуль и возрастают интенсивнее, чем расчётные. Знак напряжений отрицательный.

4. По мере увеличения степени деформации разность расчётных и экспериментальных значений остаточных напряжений изменяются следующим образом:

– разность результатов для первого образца с ростом степени деформации увеличилась с 22,7 до 32,5%;

– разность результатов для второго образца с ростом степени деформации уменьшилась с 14,1 до 3,9%;

– разность результатов для третьего образца с ростом степени деформации уменьшилась с 35,5 до 10,0%.

Анализ полученных результатов показывает:

1. Знак экспериментальных и расчётных значений RS_1 совпадает.

2. После образования шейки наблюдается некоторая корреляция полученных значений RS_1 .

Сказанное свидетельствует о возможности применения теоремы о разгрузке даже при относительно больших пластических деформациях. Однако данный вывод требует дальнейшей проверки на больших партиях образцов из данного материала и других материалов.

Несмотря на неоднозначность, полученные результаты позволяют сделать некоторые практические выводы. Например, у осесимметричных прутковых изделий, полученных прокаткой или волочением, часто наблюдается саблевидность, которую исправляют путём растяжения с небольшими степенями пластической деформации. Полученные в данной статье результаты показывают, что в этом случае на поверхности прутков возникают растягивающие RS_1 , что является неблагоприятным фактором. Для изменения знака RS_1 необходимо проводить дополнительную обработку поверхности прутков, например, шлифование и последующее полирование.

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

Список литературы

1. Давиденков Н.Н., Спиридонова Н.И. Анализ напряженного состояния в шейке растянутого образца // Заводская лаборатория. 1945. № 6. С. 583.
2. Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: Машиностроение, 1963. 230 с.
3. Ильюшин А.А. Пластичность. Ч.1. Упругопластические деформации. М.; Л.: Гостехиздат, 1948. 376 с.
4. Койтер В.Т. Общие теоремы упругопластических сред. М.: Изд-во иностр. лит., 1961. 79 с.
5. Поздеев А.А., Няшин Ю.И., Трусов П.В. Остаточные напряжения: теория и приложения. М.: Наука, 1982. 112 с.
6. Колмогоров Г.Л., Курапова Н.А., Мельникова Т.Е. Предельные режимы осесимметричного деформирования металлов // Вестник ПГТУ. Технологическая механика. 1996. №2. С. 16–24.
7. Бриджмен П. Исследование больших пластических деформаций и разрыва. М.: Изд-во иностр. лит., 1955.
8. Остсемин А.А. К анализу напряженного состояния в эллиптической шейке образца при растяжении // Проблемы прочности. 2009. №4.
9. Нейбер Г. Концентрация напряжений. М.; Л.: Гостехиздат, 1947. 204 с.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DETERMINATION OF RESIDUAL STRESSES
IN UNIAXIAL PLASTIC DEFORMATION OF A CYLINDRICAL ROD

Trofimov Viktor Nikolayevich – D.Sc. (Eng.), Professor, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia. Phone: +7 (342) 239-13-40. E-mail: tvn_perm@mail.ru.

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

Panin Yuri Valerievich – Postgraduate Student, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia. Phone: +7 (342) 239-13-40, E-mail: dpm@pstu.ru.

Korionov Maxim Anatolievich – M. (Eng.), Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia. Phone: +7 (342) 239-13-40, E-mail: dpm@pstu.ru.

Abstract. The article discusses the possibility of applying a theorem on unloading to determine residual macroscopic stresses during plastic deformation of a cylindrical rod. X-ray diffractometry was used to experimentally determine residual stresses on a rod surface. The experimental results were used for the theoretical calculation of residual stresses. The authors made conclusions about the possibility of applying the theorem on unloading for the theoretical determination of residual stresses.

Keywords: Residual stresses, X-ray diffractometry, theorem on unloading.

References

1. Davidenkov N.N., Spiridonova N.I. Analiz napryazhennogo sostoyaniya v sheike rastyanutogo obratzsa [Analysis of the stress state in a neck of a stretched sample]. *Zavodskaya laboratoriya* [The plant laboratory], 1945, no. 6, 583 p.
2. Birger I.A. *Ostatochnye napryazheniya* [Residual stresses]. Moscow, 1963, 230 p.
3. Ilyushin A.A. *Plastichnost. Ch.1. Uprugoplasticheskie deformatsii* [Plasticity. P.1., Elastic-plastic deformation]. Moscow-Leningrad. Gostekhizdat, 1948, 376 p.
4. Koiter V.T. *Obshchie teoremy uprugoplasticheskikh sred* [General theorems of elastic-plastic media]. Moscow, 1961, 79 p.
5. Pozdееv A.A., Nyashin Yu.I., Trusov P.V. *Ostatochnye napryazheniya* [Residual stresses: theory and applications]. Moscow: Nauka, 1982, 112 p.
6. Kolmogorov G.L., Kurapova N.A., Melnikova T.E. *Predelnye rezhimy osesimmetrichnogo deformirovaniya metallov* [Limit modes of axisymmetric deformation of metals]. *Vestnik PGU. Tekhnologicheskaya mekhanika* [PSTU Technological Mechanics Bulletin], 1996, no. 2, pp. 16-24.
7. Bridgman P. *Issledovanie bolshikh plasticheskikh deformatsii i razryva* [Studies of large plastic deformations and fracture]. Moscow, 1955, 444 p.
8. Ostsemin A. A. Analysis of the stress state in an elliptical neck of the sample under tension. *Problemy prochnosti* [Problems of strength]. 2009, no. 4.
9. Neiber G. *Kontsentratsiya napryazhenii* [The stress concentration]. Moscow, Leningrad: Gostekhizdat, 1947, 204 p.

Определение остаточных напряжений при одноосной пластической деформации цилиндрического стержня / Трофимов В.Н., Карманов В.В., Панин Ю.В., Корионов М.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №2. С. 48–53.

Trofimov V.N., Karmanov V.V., Panin Yu.V., Korionov M.A. Determination of residual stresses in uniaxial plastic deformation of a cylindrical rod. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 2, pp. 48–53.

ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

УДК 621.74

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КАЧЕСТВА ПРИРОДНОГО СКРЫТОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ГРАФИТА ОТ РЕЖИМОВ ПОДГОТОВКИ*

Баранов В.Н., Довженко Н.Н., Гильманшина Т.Р., Лыткина С.И., Худоногов С.А.

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

Аннотация. В работе исследовали влияние времени активации, типа и содержания поверхностно-активных веществ на средний размер и общую поверхность частиц кристаллического и скрытокристаллического графитов различных месторождений, отходов углеродсодержащих материалов в планетарно-центробежной мельнице АГО-2. Показано, что максимальная дисперсность графитов и углеродсодержащих отходов достигается при 20 мин активации без добавления поверхностно-активных веществ. Наиболее эффективными поверхностно-активными веществами являются добавки, содержащие в своем составе сульфогруппы. Содержание добавки не может превышать 3%.

Ключевые слова: активация, графит, средний размер частиц, общая поверхность частиц, поверхностно-активные вещества, планетарно-центробежная мельница АГО-2.

Введение

Повышение качества отливок является актуальной задачей на всех этапах развития литейного производства. В настоящее время более 40% отливок получают из чугуна методом литья в разовые формы, в которых большая доля дефектов поверхности приходится на пригар.

Наиболее доступным и распространенным способом предотвращения пригара является применение противопригарных покрытий, в качестве основных наполнителей которых для чугуна и некоторых видов цветного литья используют углеродсодержащие материалы [1–3].

Углеродные материалы, как и другое минеральное сырье, проходит стадии подготовки: дробление, измельчение, обогащение, классификацию и перемешивание. Каждый из этих процессов осуществляется на самостоятельном оборудовании, и перевод таких процессов на более высокий технологический уровень требует дополнительного оборудования, энерго- и трудозатрат. Выбранная для исследований технология механоактивации и механосинтеза углеродных материалов позволяет после дробления все остальные процессы осуществлять в одном агрегате – энергонапряженной «мельнице-активаторе-смесителе» определенного типа. При этом материал можно наноструктурировать и

осуществлять механосинтез различных композиций с высокой степенью их гомогенизации [4–6].

Поэтому целью данной работы было исследовать влияние времени активации, типа и содержания поверхностно-активных веществ на средний размер и общую поверхность углеродсодержащих материалов различного кристаллохимического строения.

Материалы и методы исследования

Для исследований были выбраны графиты Ногинского (ГЛС-3), Курейского, Завальевского (ГЛ-1) и Якутского (98-К3) месторождений; отходы искусственных графитов (И) и углеродных материалов (Новокузнецкие металлургические шлаки марок ККЦ-1 и ККЦ-2).

Кристаллический графит ГЛ-1 Завальевского месторождения (ГОСТ 17022-81) представляет собой тонкопластинчатый графит. Особенностью графита является наличие сростков его с примесями (например, с кальцитами) [7].

Графит месторождений Красноярского края (Ногинское (ГОСТ 17022-81) и Курейское) относится к высокозольным графитам скрытокристаллического типа. Основным минералом в рудах данных месторождений является графит, второстепенными – нерудные минералы, сульфиды и углистое вещество. Нерудные минералы представлены кварцем, полевыми шпатами, кальцитом, хлоритом. Для графита ГЛС-2 Курейского место-

* Работа выполнена под руководством д-ра техн. наук, проф. [Маминой Л.И.]

рождения содержание минералов кальцита и кварца колеблется в широких пределах – 5–50% и может составлять половину нерудных минералов. Растворенная в серной кислоте форма соединений железа для Курейского месторождения достигает 3,62%, для Ногинского – 4,8% [8–10].

В настоящее время охране окружающей среды от различных загрязнений уделяется особое внимание. Поэтому в работе исследовали отходы литейного производства ООО «Сибинстрем» (г. Красноярск) – искусственный графит (И). Для сравнения были исследованы шлаки металлургического производства марок ККЦ-1 и ККЦ-2. Содержание углерода в шлаке ККЦ-1 составляет 42–60%, в шлаке ККЦ-2 ≈40%.

Природные графиты Ногинского, Курейского и Завальевского месторождений активировались после их обработки на графитовых фабриках, в то время как графиты Якутского месторождений предварительной обработки не проходили.

В качестве эталонных для кристаллических графитов брались коллоидные графиты Завальевского месторождения марки С-3 (ТУ 113-08-48-63-90) и Тайгинского месторождения марки П (ГОСТ 17022-81); для скрытокристаллических – печная сажа.

Исследуемые углеродные материалы измельчали в мельнице планетарно-центрибежного типа АГО-2. Время измельчения варьировалось от 1 до 20 мин. Режимы механоактивации природных графитов рассмотрены в работах [7, 8, 11].

Эффективность активации оценивали по изменению среднего размера частиц и общей поверхности, исследованных при помощи светозерного рассева в Новосибирском институте твердого тела.

На рис. 1 и 2 представлены зависимости среднего размера и общей поверхности частиц графитов различного кристаллохимического строения от времени активации.

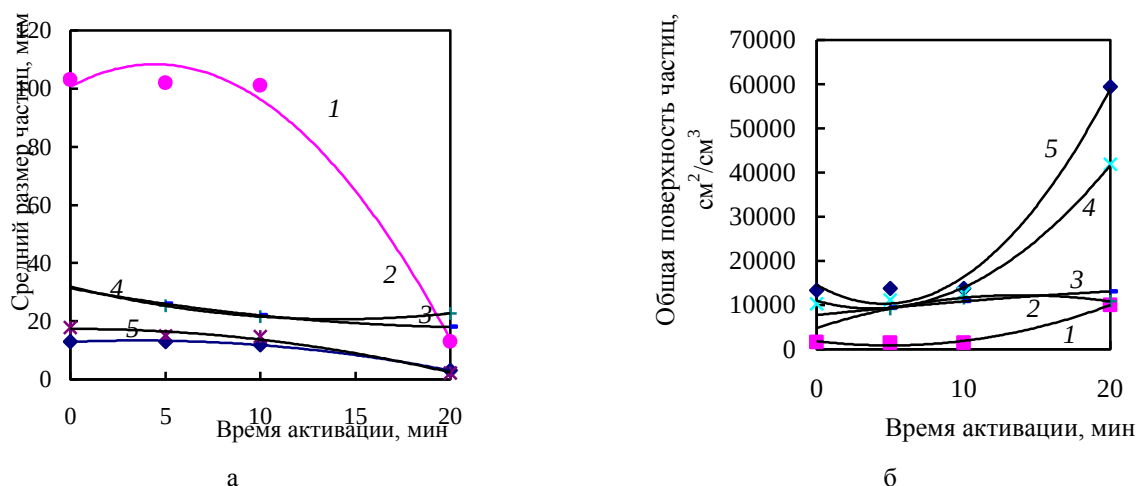


Рис. 1. Зависимость среднего размера (а) и общей поверхности (б) частиц природных графитов от времени активации: 1 – ГЛ-1; 2 – Якутский 98-КЗ; 3 – Якутский 98-51; 4 – ГЛС-2; 5 – ГЛС-3

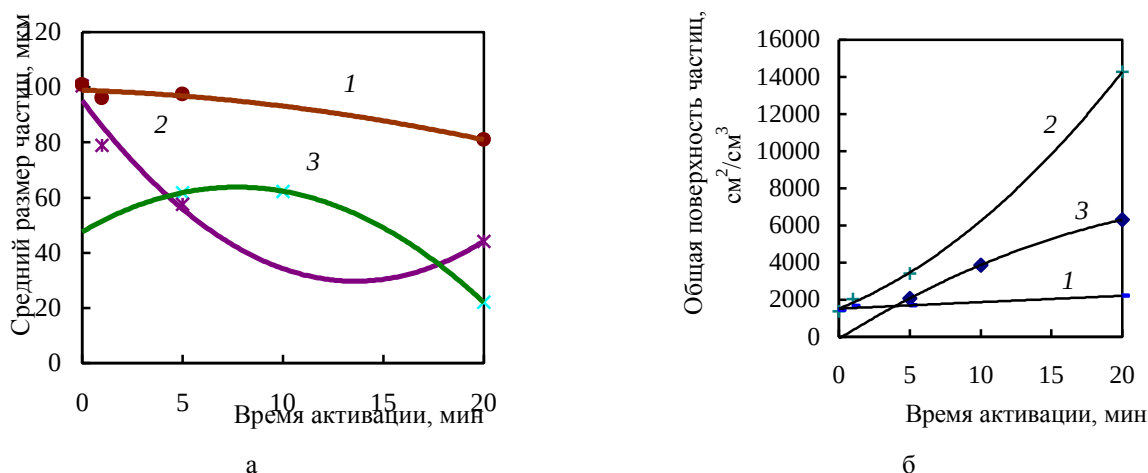


Рис. 2. Зависимость среднего размера (а) и общей поверхности (б) частиц природных графитов от времени активации: 1 – ККЦ-2; 2 – ККЦ-1; 3 – И

Значения параметров эталонных графитов представлены в **таблице**.

**Данные светолазерного рассеяния
для эталонных графитов**

Графиты	Средний размер частиц, мкм	Поверхность, см ² /см ³
Печная сажа	1,3–1,4	48 000–64 738
С-3	5,7	14 284
П	57,6	2 004

Из представленных данных видно, что в ходе активации общая поверхность кристаллических графитов увеличивается в 2–6 раз, скрытокристаллических графитов – в 4–6 раз, при уменьшении среднего размера частиц в 2–7 (для кристаллических) и в 7–8 раз (для скрытокристаллических). Измельчение скрытокристаллических графитов происходит легче, чем кристаллических, что связано с особенностями их структуры.

Сравнивая значения среднего размера и поверхности частиц скрытокристаллического графита различных месторождений, видно, что ногинский графит измельчается легче, чем курейский: массовое разрушение частиц графита ГЛС-3 происходит через 5 мин активации, частиц Курейского месторождения – через 10 мин активации. Это можно объяснить следующим образом. Методом оптической петрографии в курейском графите выделен чешуйчатый кристаллический компонент, который присутствует и в ГЛС-3, но в значительно меньшем количестве, хотя неоднородность микроструктуры в них практически одинакова. За счет более упорядоченной структуры кристаллический компонент измельчается труднее. После 20 мин активации значения среднего размера и поверхности частиц графита ГЛС-3 измельчения приближаются к значениям печной сажи. Значение поверхности курейского графита приближается к значению поверхности печной сажи, при том что размер частиц графита больше, чем у печной сажи в 1,7 раза.

Сравнивая кристаллические графиты с графитами марок С-3 и П, можно отметить, что значение поверхности всех графитов приближается к значению графита С-3 и больше значения поверхности П примерно в 5 раз. При том что размер частиц коллоидного графита С-3 меньше, чем у остальных в 1,5–4 раза, а графита П больше в 4–3 раза.

В результате того, что структура графита И наиболее совершенна, измельчать их значительно труднее: при уменьшении среднего размера частиц с 62 до 22 мкм поверхность возрастает с 2000 до 6500 см²/см³.

Поверхность шлака ККЦ-1 при измельчении меняется более значительно (с 2023 до 14500 см²/см³) с уменьшением среднего размера частиц с 79 до 8 мкм. Это можно объяснить тем, что шлак ККЦ-1 содержит меньше углерода, чем шлак ККЦ-2. Относительно небольшое изменение поверхности (с 1600 до 2200 см²/см³) металлургического шлака ККЦ-2 происходит при изменении среднего размера частиц с 96 до 81 мкм.

На эффективность диспергирования и активации можно влиять, изменяя режимы и среды обработки, в частности, вводя поверхностно-активные вещества (ПАВ) [12, 13].

В работе параллельно изучалось влияние на измельчаемость ногинского графита различных добавок с целью получения не только наименьшего размера частиц графита, но и наименьшей их активности.

В качестве добавок применялись следующие: синтетическое мыло (С), лигносульфонат технический (ЛСТ), вода (Н₂О), жидкое стекло (ЖС), этилсиликат (ЭТС), карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ) в количестве от 1 до 3%. Измельчение проводилось также в планетарно-центробежной мельнице АГО-2 в течение 20 мин.

Изменения среднего размера частиц и поверхности в зависимости от типа и процентного содержания добавки представлены на **рис. 3**.

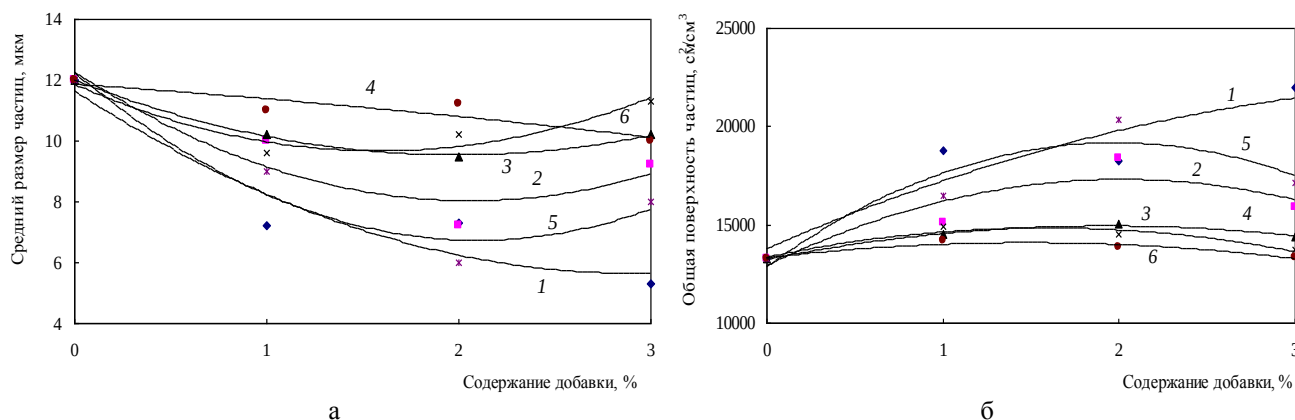


Рис. 3. Влияние добавок на измельчаемость Ногинского графита: средний размер (а) и поверхность (б) частиц: 1 – С; 2 – ЛСТ; 3 – Н₂О; 4 – ЖС; 5 – КМЦ; 6 – ЭТС

В результате полученных данных представленные добавки можно разделить на 2 группы:

– уменьшающие средний размер частиц и, следовательно, увеличивающие поверхность. Это добавки С, ЛСТ, КМЦ;

– не оказывающие значительного влияния на геометрические параметры графита в процессе его активации. Это – H_2O , ЖС, ЭТС.

Наименьший размер частиц Ногинского графита при измельчении с добавками первой группы достигается с 2% КМЦ (6 мкм с поверхностью $20358 \text{ см}^2/\text{см}^3$) и ЛСТ (7,2 мкм с поверхностью $18386 \text{ см}^2/\text{см}^3$), и 3% С (5,3 мкм с поверхностью $21970 \text{ см}^2/\text{см}^3$). Самой дешевой из представленных добавок, на сегодняшний день, является С, а следовательно, ее можно рекомендовать для применения в промышленности.

КМЦ и ЛСТ являются отходами деревообрабатывающей промышленности. Л-1 – типичный олигомер, т.е. полимерная коллоидная система, структурное звено которой содержит сульфогруппу и гидроксильную группу. КМЦ – высокомолекулярное вещество, также содержащее сульфогруппы.

Вероятно, сульфогруппы и гидроксильные группы, присутствующие в этих веществах, в процессе активации адсорбируются на поверхности частиц графита и ослабляют связи между частицами графита, что и приводит к повышению интенсивности измельчения. Это предположение подтверждает и тот факт, что дисперсность графита, активируемого с С, в составе которого присутствуют алкилсульфаты, алкилсульфонаты и алкилоламыды, незначительно отличается от дисперсности, достигаемой при активации графита с ЛСТ.

Особенностью графита, активированного с водой, является то, что в процессе активации часть порошка прилипает к шарам и стенкам цилиндров, что также уменьшает интенсивность измельчения. Также можно предполагать, что механические свойства влажного графита связаны с образованием коагуляционных структур из частиц графита, соединенных между собой тонкой прослойкой воды. Наименьшая эффективность измельчения, вероятно, будет соответствовать наибольшей прочности коагуляционной структуры порошка.

В работе [15] отмечается, что наименьшая эффективность измельчения соответствует оболочке воды в несколько насыщенных мономолекулярных слоев. При дальнейшем увеличении толщины прослоев воды между частичками происходит ослабление коагуляционной структуры, что и приводит к повышению интенсивности измельчения. Одновременно оболочки воды могут

предохранять частицы графита от агрегации. Эти предположения находятся в полном соответствии с теорией коагуляционного структурообразования, согласно которой прочность таких структур определяется ван-дер-ваальсовыми силами, эффективность действия которых распространяется на несколько молекулярных радиусов.

В отличие от КМЦ, ЛСТ, С и воды средний размер частиц графита, активированного с ЖС и ЭТС, составляет 10–11 мкм, что можно объяснить отсутствием в их составе сульфогрупп и гидроксильных групп. Неорганическое связующее ЖС представляет собой соединение кварца с солями щелочных металлов. Связующее ЭТС – кремнийорганическое связующее, молекулы которого состоят из чередующихся атомов кислорода и кремния, обрамленных органическими радикалами: метильными ($-CH_3$), этильными ($-C_2H_5$), фенольными ($-C_6H_5$) и другими.

Заключение

Таким образом, в ходе работы выявлены зависимости диспергируемости и свойств графита от режимов обработки в энергонапряженных мельницах планетарного типа и установлено, что оптимальным временем активации является 10 мин.

Показано, что при активации графита с ПАВ, содержащих в своем составе гидроксильные группы и сульфогруппы, средний размер частиц снижается с 12 до 6–7 мкм при увеличении общей поверхности до 13200 до 18500–20400 $\text{см}^2/\text{см}^3$. Содержание частиц размером 1–10 мкм в активированных графитах составляет 54–59%, коэффициент шероховатости поверхности и коэффициент формы – по 2 балла. Такие геометрические параметры позволяют прогнозировать высокие эксплуатационные свойства противопригарных покрытий на их основе.

Список литературы

1. Дорошенко С. П. Формовочные материалы и смеси. Киев: Выш. шк., 1990; Прага: СНТЛ, 1990. 415 с.
2. Литейные формовочные материалы. Формовочные, стержневые смеси и покрытия: справочник / Болдин А.Н., Давыдов Н.И., Жуковский С.С. и др. М.: Машиностроение, 2006. 507 с.
3. Леушин И.О., Бурмистров А.О. Противопригарные покрытия на основе металлофосфатных связующих // Литейное производство. 2002. № 2. С. 14–15.
4. Способы повышения качества литейного графита отдельными и комплексными методами активации: монография / Л.И. Мамина, В.И. Новожинов, Т.Р. Гильманшина [и др.]. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2011. 160 с.
5. Молчанов В.И., Селезнева О.Г., Жирнов Е.Н. Активация минералов при измельчении. М.: Недра, 1988. 208 с.
6. Влияние механических воздействий на физико-химические процессы в твердых телах: монография / В.А. Полубояров, О.В. Андришкова, И.А. Паули, З.А. Коротаева. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. 604 с. (Серия «Монография НГТУ»).
7. Баранов В.Н. Активация графита различного кристаллохи-

- мического строения для огнеупорных изделий и красок в литейном производстве: дис. ... канд. техн. наук. Красноярск: ГУЦМиЗ, 2005. 131 с.
8. Мамина Л.И. Теоретические основы механоактивации формовочных материалов и разработка ресурсосберегающих технологических материалов процессов в литейном производстве : дис. ... д-ра техн. наук. Красноярск, 1989. 426 с.
 9. Ногинское месторождение графита : отчет / М.А. Кавицкий, А.В. Поспелов. Красноярск, 1971–1977.
 10. Мельников И.И., Веселовский В.С. Состояние и перспектива развития сырьевой базы графита СССР. Вып. 9. М.: ВНИИМС, 1967.
 11. Гильманшина Т.Р. Разработка способов повышения качества литейного графита отдельными и комплексными методами активации: дис. ... канд. техн. наук. Красноярск: ГУЦМиЗ, 2004. 141 с.
 12. Ходаков Г.С. Тонкое измельчение строительных материалов. М.: Стройиздат, 1972. 238 с.
 13. Влияние поверхностно-активных веществ (ПАВ) на фракционный состав аморфного графита Ногинского месторождения Красноярского края / Д.Р. Хасиев, Л.И. Мамина, Т.Р. Гильманшина, В.И. Новозонов // Перспективные материалы, технологии, конструкции: сб. науч. тр. Вып. 7. Красноярск: САА, 2001. С. 19–20.
 14. Ходаков Г.С. Физика измельчения. М.: Стройиздат, 1972. 238 с.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

RESEARCH ON THE DEPENDENCE OF THE QUALITY OF NATURAL CRYPTOCRYSTALLINE GRAPHITE ON ITS MODES OF PREPARATION

Baranov Vladimir Nikolaevich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: vnbar79@mail.ru.

Dovzhenko Nikolai Nikolaevich – D.Sc. (Eng.), Director of the Oil and Gas Institute, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: n.dovzhenko@bk.ru.

Gilmanshina Tatiana Renatovna – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: gtr1977@mail.ru.

Lytkina Svetlana Igorevna – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: svetka-lisa@mail.ru.

Khudonogov Sergey Aleksandrovich – Assistant Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: doktor63@yandex.ru.

Abstract. The research revealed how activation time, type and amount of surface-active additives influenced on an average size and total surface area of crystalline and cryptocrystalline graphite particles, taken from different deposits, and carbon bearing waste materials, during the process of activation in a planetary centrifugal mill, AGO-2. It was shown that the maximum dispersion degree of graphite and carbon bearing waste was achieved within 20 minutes of activation without surface-active additives. The most efficient surface-active additives are additives containing sulfo groups in their structure. The amount of such additive should not exceed 3%.

Keywords: Activation, graphite, average size of particles, total surface area of particles, surface-active additives, planetary centrifugal mill AGO-2.

References

1. Doroshenko S.P. *Formovochnye materialy i smesi* [Moulding materials and mixtures]. Kiev: Higher School, 1990; Prague: SNTL, 1990. 415 p.
2. Boldin A.N., Davydov N.I., Zhukovsky S.S. et al. *Litejnye formovochnye materialy. Formovochnye, sterzhnevye smesi i pokrytiya: spravochnik* [Foundry molding materials. Molding, core mixture and coatings: a handbook]. Moscow: Mechanical Engineering, 2006. 507 p.
3. Leushin I.O., Burmistrov A.O. Metal phosphate binder-based foundry facing. *Litejnoe proizvodstvo* [Foundry]. 2002, no. 2, pp. 14–15.
4. Mamina L.I., Novozhonov V.I., Gilmanshina T.R. [et al.]. *Sposoby povysheniya kachestva litejnogo grafitu ot del'nymi i kompleksnymi metodami aktivatsii : monografiya* [Methods of improving the quality of foundry graphite using individual and integrated methods of activation: a monograph]. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2011. 160 p.
5. Molchanov V.I., Selezneva O.G., Zhirnov E.N. *Aktivatsiya mineralov pri izmel'chenii* [Activation of minerals by grinding]. Moscow: Nedra, 1988. 208 p.
6. Poluboyarov V.A., Andryushkova O.V., Pauli I.A., Korotaeva Z.A. *Vliyaniye mekhanicheskikh vozdeystviy na fiziko-khimicheskie protsessy v tverdykh telakh : monografiya* [The effect of strains on physical and chemical processes in solids: a monograph]. Novosibirsk: Publishing House of NSTU, 2011. 604 p. (Series "NSTU Monograph").
7. Baranov V.N. *Activation of graphite of various crystal-chemical structures for refractory products and paints in foundry. Ph.D. dissertation.* Krasnoyarsk: GUTsMiZ, 2005. 131 p.
8. Mamina L.I. *Theoretical foundations of mechanical activation of molding materials and development of resource-saving technological processes in foundry. D.Sc. dissertation.* Krasnoyarsk, 1989. 426 p.
9. Kavitsky M.A., Pospelov A.V. The Noginsk graphite deposit: Report. Krasnoyarsk, 1971–1977.
10. Melnikov I.I., Veselovsky V.S. *Sostoyaniye i perspektiva razvitiya syr'evoy bazy grafitu SSSR* [Status and prospects of development of the USSR raw materials base of graphite]. Moscow: VNIIMS, 1967.
11. Gilmanshina T.R. *Developing methods to improve the quality of foundry graphite using individual and integrated methods of activation. Ph.D. dissertation.* Krasnoyarsk: GUTsMiZ, 2004. 141 p.
12. Khodakov G.S. *Tonkoe izmel'cheniye stroitel'nykh materialov* [Fine grinding of building materials]. Moscow: Stroyizdat, 1972. 238 p.
13. Khasiev D.R., Mamina L.I., Gilmanshina T.R., Novozhonov V.I. Influence of surface-active agents (surfactants) on a fractional

composition of amorphous graphite of the Noginsk deposit of the Krasnoyarsk Territory. *Perspektivnye materialy, tekhnologii, konstruktssii: sbornik nauchnykh trudov* [Advanced materials, technologies, design: collection of research papers]. Issue 7. Krasno-

yarsk: SAA, 2001, pp.19-20.

14. Khodakov G.S. *Fizika izmel'cheniya* [Physics of grinding]. Moscow: Publishing house of literature on construction engineering, 1972. 238 p.

Исследование зависимости качества природного скрытокристаллического графита от режимов подготовки / Баранов В.Н., Довженко Н.Н., Гильманшина Т.Р., Лыткина С.И., Худоногов С.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №2. С. 54–59.

Baranov V.N., Dovzhenko N.N., Gilmanshina T.R., Lytkina S.I. Khudonogov S.A. Research on the dependence of the quality of natural cryptocrystalline graphite on its modes of preparation. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 2, pp. 54–59.

УДК 621.762:669

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА ИЗ СТРУЖКОВЫХ ОТХОДОВ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АД31

Загиров Н.Н., Ковалева А.А., Ольховик А.Я., Коваль О.Е.

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

Аннотация. Показана возможность изготовления пористого материала на алюминиевой основе путем реализации наиболее рациональной схемы переработки стружковых отходов производства, исключаяющей их переплав. В ее основе лежат приемы, характерные для процессов порошковой металлургии и обработки давлением, а также базовые принципы, заложенные в технологии получения пеноалюминия. Дана оценка уровня достигаемых механических характеристик и характера сформированной структуры материала.

Ключевые слова: алюминиевая стружка, отходы производства, механическое легирование, брикетирование, горячая экструзия, вспенивание, пористость, механические свойства, структура.

Введение

Одной из задач, стоящих перед производителями, занятыми в сфере производства прессованной продукции из алюминиевых сплавов, является рациональная переработка образующихся на определенных переделах, связанных с резкой металла, стружковых отходов. Чем мельче стружка, тем технически труднее, энергетически затратнее, материально, с точки зрения выхода годного, бесперспективнее и, как следствие этого, экономически невыгоднее перерабатывать ее путем переплавки. В этой связи, ранее в работах [1, 2], был рассмотрен подход, основанный на предварительном компактировании стружки сплава АД31 в брикеты с последующей экструзией их через матрицу с заданными размерами и формой рабочего отверстия методом совмещенной прокатки-прессования [3]. В результате были получены пресс-изделия и проволока из практически беспористого анизотропного структурно неоднородного материала, свойства которого обусловлены ориентировани-

ем волокон (вытянутых стружек) в одном направлении. Однако более целесообразным, на наш взгляд, является изыскание достаточно доступных способов переработки алюминиевой стружки в высокопористые полуфабрикаты, наиболее очевидный из которых предполагает использование в своей основе общих технологических принципов получения так называемого пеноалюминия из вторичного сырья [4].

Материалы и методы исследования

Целью работы являлось составление и практическое опробование принципиальной схемы переработки стружки (опилок) алюминиевого сплава АД31, образующейся при резке прессованных профилей, в высокопористые полуфабрикаты произвольной формы. В качестве порофора решено было использовать промышленный гидрид титана TiH_2 , для которого содержание водорода в этой фазе составляет по объему больше 60% (~4 мас %), а температура интенсивного разложения (дегидрирования) находится в интервале 650–700°C.

Смешивание алюминиевой стружки и порошка гидроксида титана производили в планетарной шаровой мельнице Retsch PM400 в 3 этапа с разными интервалами времени – 5, 30 и 50 мин. Предварительные эксперименты и анализ имеющихся в литературе сведений по этому вопросу показали, что из-за существования высокой вероятности получения материала со связанными между собой порами вместо изолированных содержание вводимого в алюминиевую основу гидроксида титана (порофора) не должно превышать 2% (по массе), которое и было принято в работе. В этом случае, при обеспечении заданного температурного режима вспенивания, выделяющийся водород не успевает раствориться в матричном расплаве и создает достаточное давление для образования пор. Последующее быстрое охлаждение (50°С/мин) не дает пузырькам всплыть на поверхность, «замораживая» высокую пористость.

Компактирование смеси алюминиевой стружки с порошком TiH_2 проводили односторонним горячим прессованием при нагреве пресс-формы до температуры $400 \pm 20^\circ\text{C}$. Давление прессования во всех случаях составляло 200 МПа, время выдержки под нагрузкой равнялось 5 мин. Полученные консолидированные прессовки имели форму цилиндров диаметром 40 мм и высотой 30 мм.

Ход дальнейших экспериментов показал, что пытаться проводить процесс вспенивания прессовок в чистом виде не имеет смысла, т.к. в результате реализуемого интенсивного теплового воздействия образование пор в материале не происходит, а наблюдается лишь частичное подплавление отдельных фрагментов алюминиевой стружки, которое выражается в появлении капелек расплава на поверхности прессовки. Это говорит о том, что степень связности частиц стружки с порошком TiH_2 у прессовок после обычного горячего компактирования ещё недостаточна для того, чтобы обеспечить протекание требуемых для образования пор процессов. Усилить указанные связи можно, осуществляя дальнейшую горячую пластическую деформацию прессовок, например экструзию их через матрицу с заданным рабочим отверстием.

Учитывая, что при экструзии алюминиевых заготовок можно обеспечить изотермические условия деформирования, в экспериментах прессовку из смеси алюминиевой стружки и порошка гидроксида титана, с предварительно нанесенной на все контактные поверхности с инструментом смазкой, после помещения ее в контейнер нагревали вместе

с инструментальной оснасткой, смонтированной на столе вертикального гидравлического пресса усилием 1 МН, до температуры порядка 450°C . После чего осуществляли непосредственно процесс экструзии. В ходе ее давление от траверсы пресса через пуансон и пресс-шайбу передается на прессовку, происходит ее распрессовка и выдавливание через очко матрицы с оставлением пресс-остатка высотой ориентировочно 5–7 мм. Далее пресс-изделие отделяют от пресс-остатка и охлаждают на воздухе.

В работе экструзией получали прутки диаметрами 6 мм (коэффициент вытяжки μ при этом приблизительно составлял 56), 8 мм ($\mu \approx 32$) и 12 мм ($\mu \approx 14$). При этом независимо от того, с каким коэффициентом вытяжки осуществляется горячая экструзия и какое время смешивания принято при формировании смеси перед горячим прессованием, прутки могут экструдироваться по описанному выше технологическому режиму достаточно устойчиво.

После экструзии от полученных прутков отбирались образцы, на которых изучали механические характеристики материала и его структурные особенности. При выборе места вырезки образцов с цилиндрических образцов на сжатие с построением графической зависимости «напряжение течения – степень деформации сдвига при сжатии». Напряжение течения $\sigma_{\text{сж}}$ рассчитывали делением текущих значений усилия деформирования P на площадь поперечного сечения F в соответствующий момент времени: $\sigma_{\text{сж}} = P/F$.

Степень деформации сдвига находили по формуле $\lambda = \sqrt{3} \ln \frac{h_0}{h}$, где h_0 и h – высота осаждаемого образца до и после деформирования с определенным обжатием соответственно.

Само сжатие образцов, начальная высота которых составляла $h_0 = 8,5\text{--}10$ мм, осуществляли на универсальной электромеханической испытательной машине LFM-400 с установленными на ней плоскими бойками. Весь ход испытания выводился на экран дисплея и в конечном итоге регистрировался и оформлялся соответствующим специальным протоколом. После обработки всех протоколов полученные результаты были сгруппированы в виде указанных выше зависимостей отдельно для разных значений коэффициентов вытяжки при экструзии (рис. 1, а) и разного времени перемешивания компонентов при приготовлении смеси перед горячим прессованием (рис. 1, б).

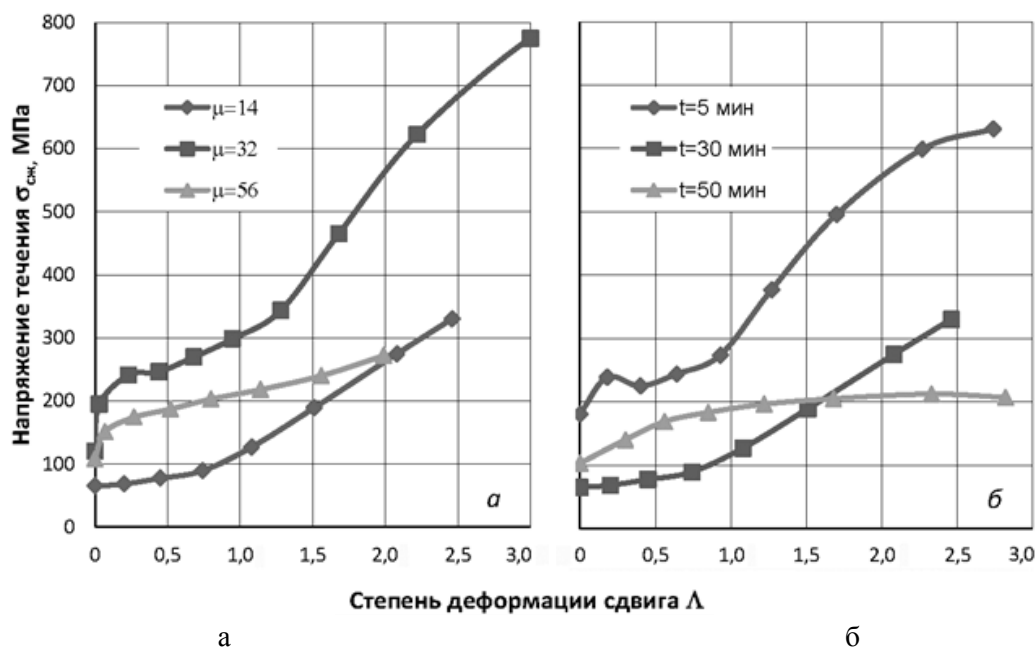


Рис. 1. Изменение прочностных характеристик образцов прутков, полученных: а – с разным значением коэффициента вытяжки μ (время перемешивания при формировании исходной смеси составляло 30 мин); б – из смесей, сформированных при разном времени перемешивания t (диаметр прутка составлял 12 мм)

Из рис. 1, а видно, что наибольшим сопротивлением деформации обладает пруток $\varnothing 8$ мм, полученный с коэффициентом вытяжки $\mu=32$. По-видимому, именно при этой вытяжке удастся обеспечить наиболее устойчивые связи между отдельными частицами алюминиевой стружки, определяющими общую прочность формируемых пресс-изделий.

Время перемешивания при составлении смеси алюминиевой стружки с порошком гидрида титана, влияние которого показано на рис. 1, б, принципиального значения на уровень прочностных характеристик пресс-изделий не оказывает, поскольку наибольшие значения их приходятся на минимально принятое в работе время перемешивания, равное 5 мин.

Характерная микроструктура полученных пресс-изделий на примере горячепрессованного прутка $\varnothing 12$ мм приведена на рис. 2. Видно, что материал прутка обладает некоторой остаточной пористостью, причем расположение пор и их величина достаточно неоднородны.

Последующую стадию получения высокопористого алюминия – вспенивание прекурсора проводили с помощью горелки Namilux, пламя которой обеспечивает необходимое тепловое воздействие для достижения требуемой температуры при высокой скорости нагрева.

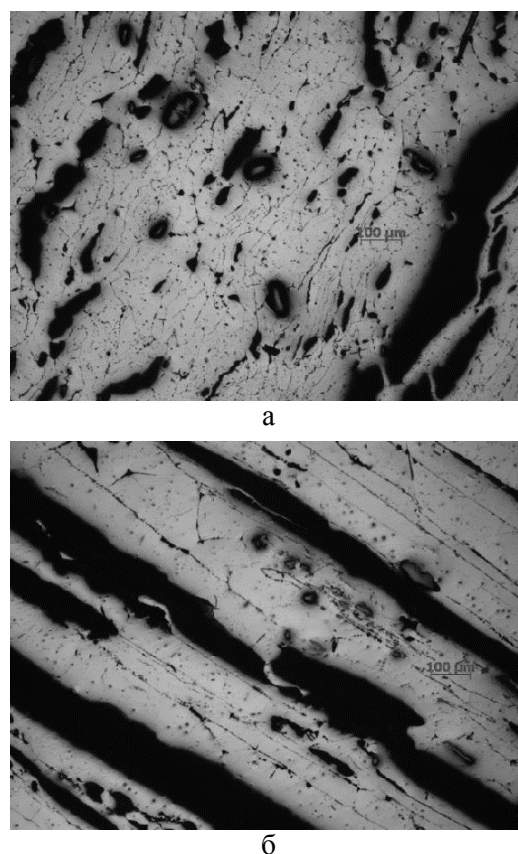


Рис. 2. Микроструктура прутка $\varnothing 12$ мм в поперечном (а) и продольном (б) направлениях, $\times 200$

Моделирование процесса вспенивания проводили на образцах пресс-изделий, как и ранее полученных с разным значением коэффициента вытяжки и с использованием для приготовления смесей разного времени перемешивания. На **рис. 3** для наглядности приведены общие виды образцов пресс-изделий до и после осуществления процесса вспенивания.



а



б

Рис. 3. Внешний вид образцов пресс-изделий после горячей экструзии (а) и осуществления процесса вспенивания (б)

Установлено, что в процессе интенсивного высокотемпературного воздействия образец разбухает, одновременно теряя цилиндрическую форму. При этом, как видно из приведенного на **рис. 4** разреза образца пресс-изделия, после вспенивания выделяющийся водород не успевает сформировать полностью сферические поры, а растворяется в жидком алюминии с последующей его диффузией из образца.

Наличие относительно больших по размерам пустот и их крайняя неравномерность

распределения по сечению объясняются наличием в объеме пресс-изделия крупных и неоднородных скоплений частиц TiH_2 , из которых моментально образуется большое количество газа. При этом выделяющийся водород не успевает весь раствориться в матрице, в результате чего поры получаются сравнительно большими и не совсем правильной формы. Более наглядно это прослеживается на фотографиях микроструктур отдельных областей пресс-изделия после вспенивания, которые приведены на **рис. 5**.



Рис. 4. Поперечный разрез образца пресс-изделия после вспенивания

Поскольку в работе ставилась задача – создать модель высокопористого материала на основе алюминия предположительно конструкционного назначения, была произведена оценка прочностных характеристик образцов пресс-изделий после вспенивания на сжатие. Построенные по результатам проведенных испытаний диаграммы в тех же координатах «напряжение течения – степень деформации сдвига» в зависимости от упоминавшихся ранее варьируемых параметров приведены на **рис. 6**.

Из анализа приведенных на **рис. 6** графиков следует, что с увеличением степени деформации сдвига при сжатии, одновременно с закрытием пустот, происходит рост сопротивления материала деформации, который отчетливо проявляется после достижения величины Λ значений порядка 1,5–2,0. При этом, как и ранее, наибольшей прочностью обладают высокопористые образцы прутков, полученные при коэффициенте вытяжки $\mu=32$ (**рис. 6, а**). Время перемешивания по-прежнему существенного влияния на прочность не оказывает (**рис. 6, б**).

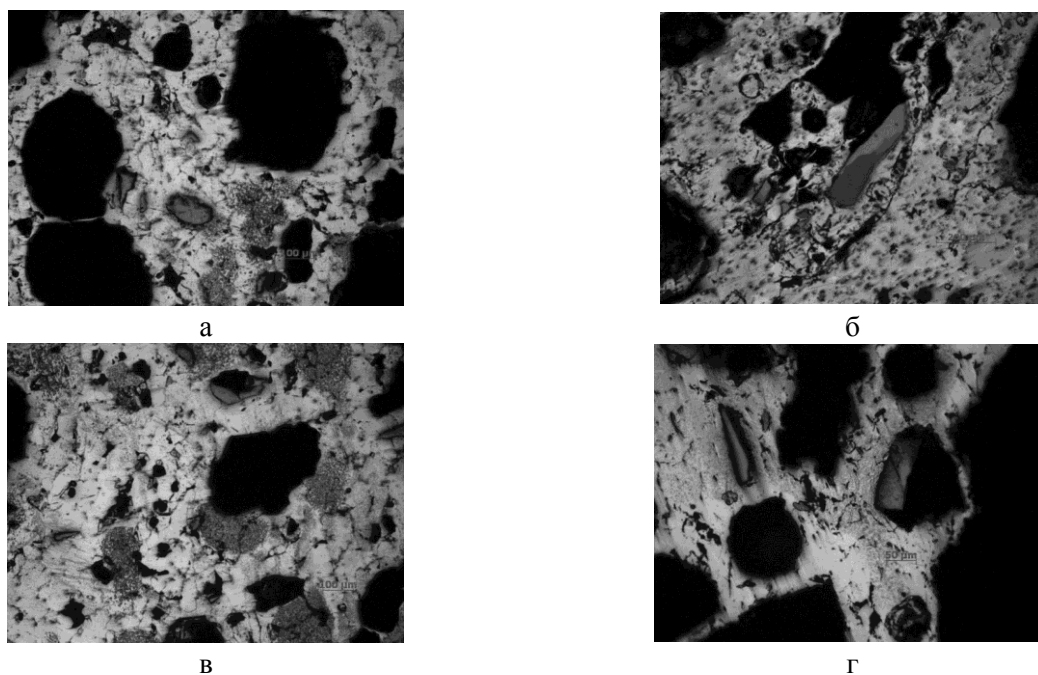
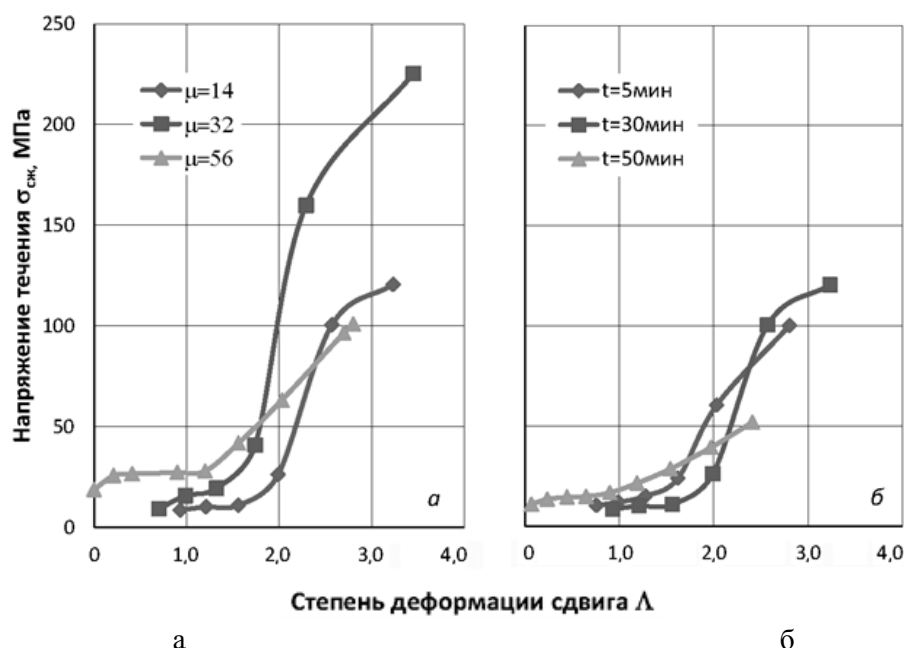
Рис. 5. Микроструктуры поперечного сечения отдельных областей пресс-изделия после вспенивания, $\times 200$ 

Рис. 6. Изменение прочностных характеристик образцов прутков после вспенивания:
 а – полученных с разным значением коэффициента вытяжки μ ;
 б – полученных из смесей, сформированных при разном времени перемешивания t

Закключение

Таким образом, по результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Для получения высокопористого материала на основе алюминия можно в ряде случаев использовать стружковые отходы производства, отвечающие определенным требованиям по сортности и степени загрязненности.

2. Смешивание стружковых алюминиевых

отходов и порообразующего порошка TiH_2 , содержание которого не должно превышать 2%, целесообразнее производить в высокоэнергетических мельницах, типа планетарной, обеспечивающей устойчивое проникновение частиц порошка в матричный сплав.

3. Компактирование сформированной смеси необходимо проводить при температурах не ниже $300-350^\circ\text{C}$. При этом давление горячего прессования должно быть не ниже $180-200$ МПа,

что обеспечивает получение прессовок относительной плотностью 90–95%.

4. Для интенсификации процесса взаимного проникновения частиц порошка вещества – порофора в матричный сплав, способствующего лучшему протеканию процесса последующего вспенивания, прессовки рекомендуется подвергать дополнительной горячей экструзии с коэффициентом вытяжки, лежащем в интервале значений от 30 до 40.

5. Нагрев прекурсора выше температуры разложения порофора (TiH_2) при выбранном температурно-скоростном режиме лучше производить в соответствующей форме для образования пористой структуры. При этом температура вспенивания должна находиться выше температуры ликвидуса матричного сплава, а скорость нагрева должна составлять порядка 150–200°C/мин.

При соблюдении всех перечисленных условий предложенная технология позволит полу-

чать высокопористый алюминий с пористостью от 20 до 40%, размерами пор от 1,0 до 3,0 мм и прочностью материала порядка от 20 до 40 МПа.

Список литературы

1. Исследование структуры и свойств деформированных полуфабрикатов, полученных из сыпучей стружки сплава системы алюминий-магний-кремний / Загиров Н.Н., Сидельников С.Б., Иванов Е.В., Аникина В.И. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2010. №2. С. 50–56.
2. Ковалева А.А., Аникина В.И., Загиров Н.Н. Анализ формирования структурных зон в стружковом материале из сплава АД31, полученного обработкой давлением // Техника и технология. 2014. №7(3), С. 304–308.
3. Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Загиров Н.Н. Комбинированные и совмещенные методы обработки цветных металлов и сплавов: монография. М.: МАКС Пресс, 2005. 344 с.
4. Иванов Д.О., Аксенов А.А., Иванов А.А. Исследование и моделирование пеноалюминия, полученного из вторичного алюминиевого сырья с использованием метода механического легирования // Изв. вузов. Цветная металлургия. 2007. №6. С. 56–61.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

A TECHNOLOGICAL ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY OF PRODUCING A HIGHLY POROUS MATERIAL FROM AD31 ALUMINUM ALLOY CHIP WASTES

Zagirov Nikolay Nailich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. Phone: +7 (391) 206-37-31. E-mail: sbs270359@yandex.ru.

Kovaleva Angelina Adolfovna – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. Phone: +7 (391) 206-36-75. E-mail: angeli-kovaleva@yandex.ru.

Olkhovik Aleksey Yakovlevich – Master's Degree Student, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. Phone: +7 (391) 206-37-31.

Koval Olga Evgenievna – Student, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. Phone: +7 (391) 206-36-75.

Abstract. This paper shows the possibility of making an aluminum-based porous material through the implementation of the most efficient scheme of processing chip production waste, excluding their remelting. It is based on techniques that are typical of the processes of powder metallurgy and metal forming, as well as on the basic principles laid down in the technology of foam aluminum production. A level of achieved mechanical characteristics and the nature of the formed structure of the material were assessed.

Keywords: Aluminum chips, production waste, mechanical alloying, briquetting, hot extrusion, foaming, porosity, mechanical properties, structure.

References

1. Zagirov N.N., Sidelnikov S.B., Ivanov E.V., Anikina V.I. The study of the structure and properties of deformed semi-finished prod-

- ucts made from shovelling aluminum-magnesium-silicon alloy chips. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2010, no. 2, pp. 50-56.
2. Kovaleva A.A., Anikina V.I., Zagirov N.N. Analysis of the formation of structural zones in chip materials produced from the AD31 alloy by metal forming. *Tekhnika i tekhnologiya* [Engineering and technology]. 2014, no. 7(3), pp. 304-308.
3. Sidelnikov S.B., Dovzhenko N.N., Zagirov N.N. *Kombinirovannye i sovmeshchennyye metody obrabotki tsvetnykh metallov i spлавov: monografiya* [Combined methods of treatment of nonferrous metals and alloys: a monograph]. Moscow: MAKS Press, 2005, 344 p.
4. Ivanov D.O., Aksenov A.A., Ivanov A.A. Research and modeling of foam aluminum produced from recycled aluminum raw materials using a method of mechanical alloying. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya* [News of universities. Nonferrous metallurgy], 2007, no. 6, pp.56-61.

Технологическая оценка возможности получения высокопористого материала из стружковых отходов алюминиевого сплава АД31 / Загиров Н.Н., Ковалева А.А., Ольховик А.Я., Коваль О.Е. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №2. С. 59–64.

Zagirov N.N., Kovaleva A.A., Olkhovik A.Ya., Koval O.E. A technological assessment of the possibility of producing a highly porous material from AD31 aluminum alloy chip wastes. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 2, pp. 59–64.

НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

УДК 66.094.27:546.57-022.532

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА И ВОЗМОЖНОСТЬ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ПИЩЕВОЙ УПАКОВКЕ

Коляда Л.Г., Медяник Н.Л., Ефимова Ю.Ю., Кремнева А.В.

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

Аннотация. В работе исследованы условия синтеза золей наночастиц серебра при химическом восстановлении нитрата серебра глюкозой. Методами оптической спектроскопии, электронной спектроскопии, синхронного термического анализа проведены физико-химические исследования синтезированных золей наночастиц серебра. На спектре поглощения фиксируется выраженный максимум при длине волны 430 нм, что соответствует частицам серебра размерами до 50 нм. Методами сканирующей электронной микроскопии и микрорентгеноспектрального анализа обнаружены наночастицы серебра с размерами до 50 нм. Также встречаются более крупные агрегаты размерами до 160 нм. На кривой ТГ/ДСК пик при температуре 961°C, соответствующий температуре плавления серебра, отсутствует, что подтверждает образование нанокристаллических (аморфных) структур серебра. Влияние наночастиц серебра на срок хранения свежего молока исследовали на основе кислотности молока. Установлено, что в упаковке, содержащей наночастицы серебра, кислотность молока нарастает медленнее.

Ключевые слова: нитрат серебра, глюкоза, наночастицы, оптический спектр поглощения, упаковка, кислотность молока, срок хранения.

Введение

Развитие современной техники невозможно без создания материалов нового поколения с заранее заданными свойствами. Одним из путей решения этой задачи является получение композиционных материалов, содержащих наночастицы серебра.

Проведенные фундаментальные исследования [1, 2] показали, что наночастицы серебра обладают уникальными оптическими свойствами, обусловленными поверхностным плазмонным резонансом, высокоразвитой поверхностью, каталитической активностью и др. Одно из ценных свойств наносеребра – это выраженная биологическая антибактериальная активность, благодаря чему наночастицы серебра могут применяться в экологических и медицинских целях, например для обеззараживания питьевой воды, в пищевых упаковочных материалах.

Материалы и методы исследования

Методы получения наночастиц можно разделить на физические и химические. В физических методах наночастицы образуются вследствие

измельчения больших металлических частиц с помощью коллоидных мельниц или ультразвукового диспергирования, а в химических методах наночастицы получают в результате химического восстановления в растворе ионов металлов. В качестве восстановителей используют: боргидрид натрия, гидразин, цитрат натрия, глюкозу, аскорбиновую кислоту и др. Для получения наночастиц серебра широко используется цитратный метод (метод Туркевича) [2]. Отличительная черта метода Туркевича состоит в том, что цитрат-анион выступает одновременно в качестве восстановителя и стабилизирующего агента. На начальном этапе восстановления происходит образование кластеров (Ag_x в общем виде). В момент образования кластеры Ag_x взаимодействуют с цитратом (cit), и после этого происходит их объединение в более крупные частицы. При достижении критического размера (50–100 атомов или 1–1,5 нм) рост кластеров по механизму конденсации практически прекращается. Дальнейший рост частиц происходит в результате восстановления ионов серебра на поверхности кластера. Образующиеся по такому

механизму наночастицы серебра не склонны к агрегации, имеют сферическую форму и узкое распределение по размерам.

Реакцию восстановления проводят в различных условиях [1, 2]. При этом важное значение имеет стабилизация наночастиц серебра, так как последние подвергаются быстрому окислению и легко агрегируют в растворах. Наиболее надежная стабилизация кластеров происходит при промежуточных концентрациях цитрата ($1-5 \cdot 10^{-4}$ моль $\cdot$ л $^{-1}$) [2].

Цель работы заключалась в получении стабильных золей, содержащих наночастицы серебра, и исследование их физико-химических свойств.

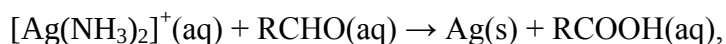
Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- синтез наночастиц серебра;
- исследование состава и свойств золей, содержащих наночастицы серебра;
- исследование влияния наночастиц серебра на кислотность молока.

Синтез наночастиц серебра проводили путем восстановления водного раствора нитрата серебра (AgNO_3). В качестве восстановителя использовали глюкозу ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$). Химическое восстановление есть многофакторный процесс и зависит от подбора пары окислитель-восстановитель, их концентраций и условий осуществления процесса. Оптимальные концентрации исходных растворов были установлены в работах [5, 6].

Гидрозоль наночастиц серебра (восстановитель – глюкоза) готовили смешением 0,0001 М раствора нитрата серебра и 0,05 М раствора глюкозы в соотношении объемов 1:1. Все растворы готовили на бидистиллированной воде. Обработку смеси проводили раствором гидроксида аммония (1,25%) до pH 8–9, так как размеры наночастиц серебра зависят от pH среды [1]. После экспозиции при температуре 96–98°C в течение 120 минут полученный золь стабилизировали с использованием токов высокой частоты. Полученный золь имеет ярко-желтую окраску.

Для получения наночастиц серебра применяется реакция Толленса [2]:



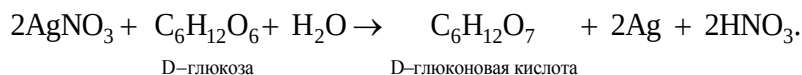
где RCHO – альдегид или углевод.

Аммиачный комплекс оксида серебра образуется при взаимодействии нитрата серебра с аммиаком:



Глюкоза является одновременно восстановителем и стабилизатором. Продукт окисления глюкозы – глюконовая кислота может адсорбироваться на поверхности наночастиц и контролировать их рост. В данных условиях образующиеся наночастицы серебра не склонны к агрегации.

Предполагаемая схема протекания химической реакции:



D–глюкоза

D–глюконовая кислота

Для исследования нанокомпозитов использовался комплекс физико-химических методов: оптическая спектроскопия в видимой и УФ областях (спектрофотометр СФ-26), электронная микроскопия (микроскоп JSM 6490 LV), микро-рентгеноспектральный анализ, синхронный термический анализ (синхронный термоанализатор – STA 449 F3 Jupiter® компании NETZSCH).

Характерной чертой наночастиц является сильное и специфическое взаимодействие с электромагнитным излучением. Особенностью спектров поглощения наночастиц размером более 2 нм является присутствие широкой полосы поверхностно-плазмонного резонанса (ППР) в видимой области или в прилегающей к ней ближней УФ-области. Спектральный максимум вблизи 400 нм соответствует ППР изолированных и слабо взаимодействующих наночастиц серебра [2]. Спектры поглощения Ag-гидрозоля регистрировали при комнатной температуре в области 300–600 нм. На спектре поглощения (рис. 1) фиксируется выраженный максимум при длине волны 430 нм. Образующиеся наночастицы способны существовать продолжительное время: после экспозиции в течение 5, 13 суток спектр поглощения золя практически не изменяется, что свидетельствует об отсутствии активной агрегации частиц. Максимум при длине волны 430 нм соответствует частицам серебра размерами до 50 нм [2].

Методом сканирующей электронной микроскопии получены фотографии наночастиц серебра (рис. 2). Наряду с размерами наночастиц до 50 нм встречаются более крупные агрегаты размерами до 160 нм.

На рис. 3 представлено распределение наночастиц серебра: частицы подсвечиваются в тех областях, в которых они непосредственно присутствуют.

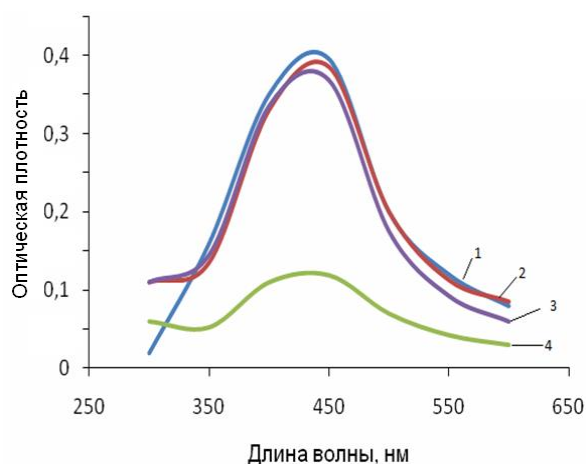


Рис. 1. Спектры поглощения золя:
1 – свежеприготовленный золь; 2 – золь (5 суток);
3 – золь (13 суток); 4 – нестабилизированный золь

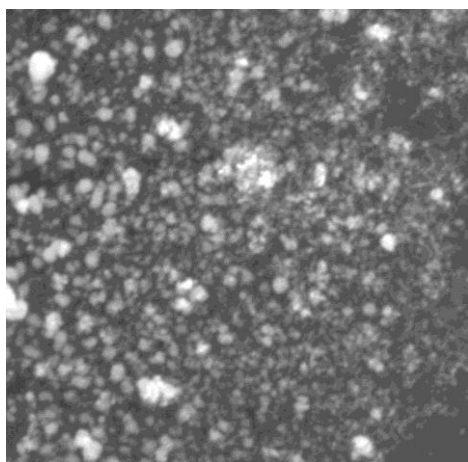


Рис. 2. Изображение наночастиц серебра,
полученное методом сканирующей
электронной микроскопии

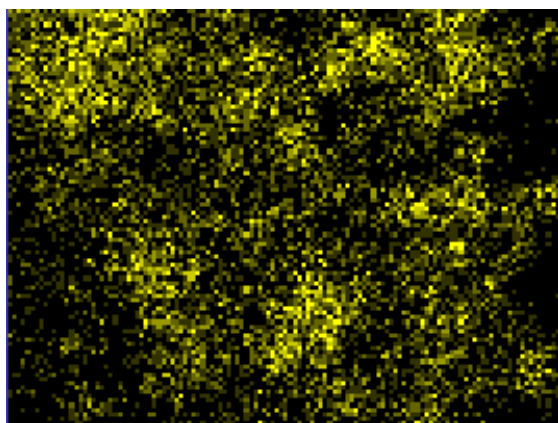
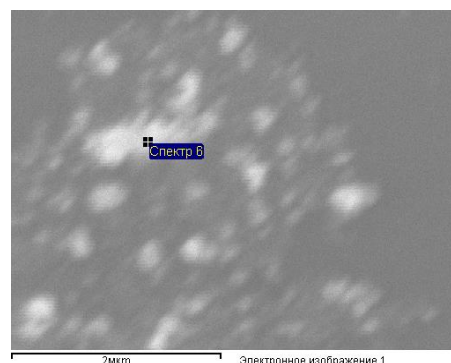


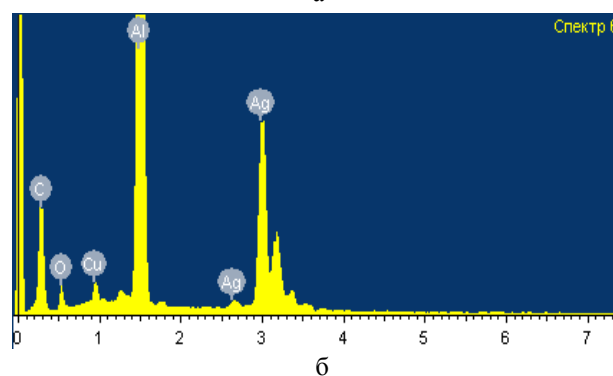
Рис. 3. Распределение наночастиц серебра

Состав золя исследовали с использованием микрорентгеноспектрального анализа. Как видно из рис. 4, на спектрах присутствует углерод и кислород, относящиеся к исходному углеводоро-

ду – глюкозе. Наличие алюминия и меди в спектре относится к подложке прибора, на которую наносили золь. Присутствие в образце золя серебра подтверждает образование его наночастиц.



а



б

Элемент	Весовой, %	Атомный, %
C	33,78	59,28
O	6,45	8,49
Al	34,79	27,17
Cu	1,32	0,44
Ag	23,67	4,62
Итоги	100,00	

в

Рис. 4. Изображение (а), спектр (б)
и результаты (в) микрорентгеноспектрального
анализа золя серебра

Кривая синхронного термического анализа золя представлена на рис. 5. По мере повышения температуры потеря массы связана с испарением воды и органических компонентов. Содержание воды составляет 23,30%, и она полностью испаряется при 99°C. Содержание органических компонентов – 59,91%, и они полностью разлагаются при 139 °C. Пик при температуре 961°C (температура плавления серебра) на кривой ТГ/ДСК отсутствует. Поскольку у нанокристаллических (аморфных) структур нет ярко выраженного пика плавления, так как им практически не требуется энергии на разрушение кристаллической решетки, то можно предположить – в растворе присутствуют именно наночастицы серебра.

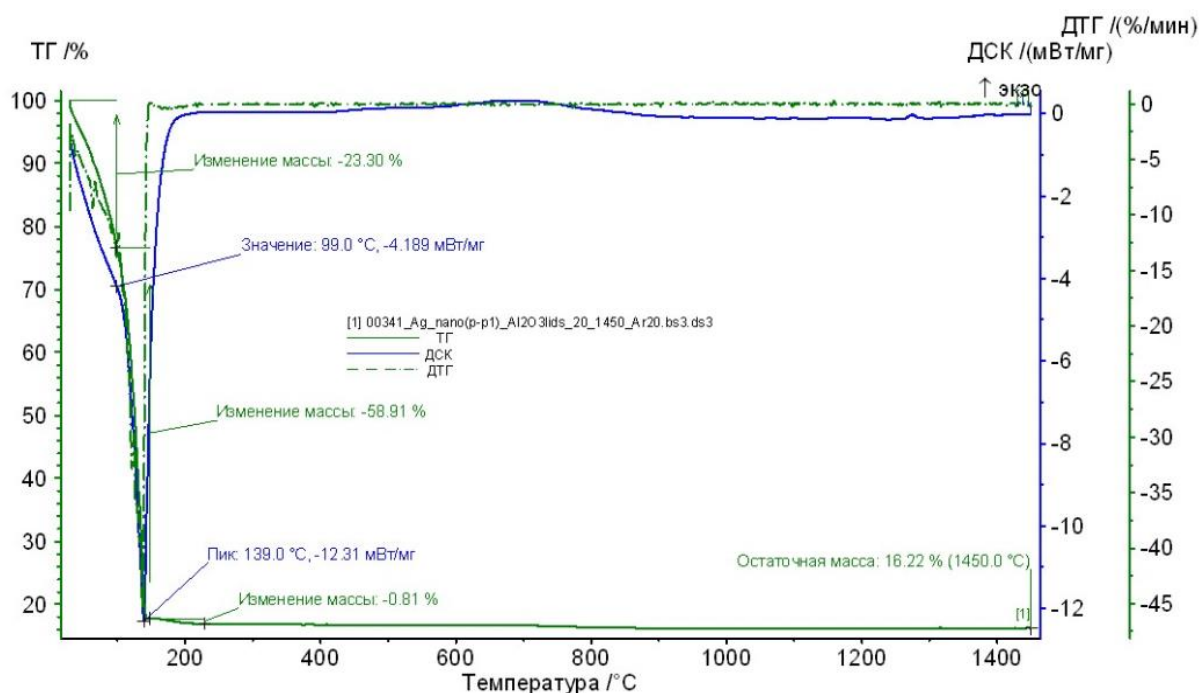


Рис. 5. Кривая синхронного термического анализа золь серебра (восстановитель – глюкоза)

Новой областью развития упаковочной отрасли являются «активные упаковки». Задание «активной упаковки» – направленное воздействие на продукт для обеспечения более высокого его качества, а также для продления периода стабильности и пригодности к потреблению. Для успешного функционирования «активной упаковки», замедления порчи продукта и продления срока его хранения необходимы бактерицидная среда внутри упаковки, а также определенная температура и другие условия хранения упакованного продукта. Авторы исследования [7] получили и описали свойства пищевых упаковочных материалов на основе природных полимеров, обладающих антибактериальными свойствами благодаря серебросодержащему нанокompозиту.

Влияние наночастиц серебра на срок хранения свежего молока исследовали на основе кислотности молока [8]. Повышение кислотности связано с расщеплением лактозы, накоплением молочной и других органических кислот и выражается в градусах Тернера – количеством мл 0,1 н раствора гидроксида натрия (NaOH), необходимого для нейтрализации кислот, содержащихся в 100 мл молока. Несвежее молоко имеет кислотность 23 и более.

Пробы свежего молока помещались в пластиковые полипропиленовые (ПП) контейнеры, на дно которых предварительно наносили золь наночастиц серебра. После экспозиции при тем-

пературе (4–6) °C, что соответствует условиям хранения в торговых сетях, определяли кислотность молока (см. таблицу).

Таблица
Результаты определения кислотности молока по Тернеру

Экспозиция	3 суток	5 суток	7 суток	10 суток	14 суток
ПП-контейнер	17	18	18	22	47
ПП-контейнер + золь	17	17	18	19	30

В пластиковом контейнере с покрытием, содержащим наночастицы серебра, кислотность молока нарастает медленнее, чем у контрольной пробы.

Выводы:

- определены основные параметры синтеза золь наночастиц серебра (температура, концентрация растворов нитрата серебра и глюкозы);
- синтезированы наночастицы серебра, полученные восстановлением раствора нитрата серебра глюкозой;
- проведены исследования состава золь. Установлено, что при восстановлении глюкозой образуются наночастицы серебра размером до 50 нм;
- проведены исследования по влиянию наночастиц серебра на срок хранения молока. Установлено, что в пластиковом контейнере с покрытием, содержащим наночастицы серебра, кислотность молока нарастает медленнее.

Список литературы

1. Помогайло А.Д. Наночастицы металлов в полимерах. М.: Химия, 2000. 672 с.
2. Синтез и свойства наночастиц серебра: достижения и перспективы / Крутяков Ю.А., Кудринский А.А., Оленин А.Ю., Лисичкин Г.В. // Успехи химии. 2008. Т. 77. С. 242–269.
3. Вегера А.В., Зимон А.Д. Синтез и физико-химические свойства наночастиц серебра, стабилизированных кислотным желатином // Журнал прикладной химии. 2006. Т. 79, № 10. С. 1660–1663.
4. Получение композитных пленок с наночастицами серебра и их фрактальными агрегатами в полимерной матрице / Сайфуллина И.Р., Чиганова Г.А., Карпов С.В., Слабко В.В. // Журнал прикладной химии. 2006. Т. 79, вып. 9. С. 1419–1422.
5. Получение наночастиц серебра из растворов / Кремлева Н.И., Коляда Л.Г., Тарасюк Е.В., Ефимова Ю.Ю. // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: материалы 70-й межрегион. науч.-техн. конференции. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. Т. 1. С. 199–202.
6. Синтез и исследования наночастиц серебра / Коляда Л.Г., Ершова О.В., Ефимова Ю.Ю., Тарасюк Е.В. // Альманах современной науки и образования. 2013. №10(77). С. 79–82.
7. Rhim J.-W., Hong S.-I., Park H.-M., P.K.W.Ng.J. Agric. Food Chem., 54, 5814 (2006).
8. ГОСТ 3624-92. Молоко и молочные продукты. Титриметрические методы определения кислотности.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

SYNTHESIS AND RESEARCH ON SILVER NANOPARTICLES AND THEIR POSSIBLE APPLICATION IN FOOD PACKAGING

Kolyada Lyudmila Grigorievna – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7 (3519) 29-85-33. E-mail: chem@magtu.ru.

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

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

Kremneva Anastasiya Vladislavovna – Assistant Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: a-kremneva@mail.ru.

Abstract. We researched conditions of synthesis of silver nanoparticle sols by chemical reduction of silver nitrate with glucose. Optical spectroscopy, electron spectroscopy, and synchronous thermal analysis were applied to conduct physical-chemical research on synthesized silver nanoparticle sols. An absorption spectrum recorded the expressed maximum, when the wavelength was 430 nanometers that corresponds to silver nanoparticle sizes of up to 50 nanometers. Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis determined silver nanoparticles of up to 50 nanometers. Furthermore, larger aggregates of up to 160 nanometers were found. The TG/DSC curve showed no peak at 961°C (silver melting temperature), confirming that silver nanocrystalline (amorphous) structures were formed. The effect of silver nanoparticles on a shelf life of fresh milk was studied on the basis of milk acidity. It was found that in the packaging containing silver nanoparticles milk acidity grew slower.

Keywords: Silver nitrate, glucose, nanoparticles, optical absorption spectrum, packaging, shelf life.

References

1. Pomogailo A.D. *Nanochastitsy metallov v polimerakh* [Nanoparticles of metals in polymers]. Moscow: Chemistry, 2000, 672 p.
2. Krutyakov Yu.A., Kudrinsky A.A., Olenin A.Yu., Lisichkin G.V. Sintez i svoystva nanochastits serebra: dostizheniya i perspektivy. [Synthesis and properties of silver nanoparticles: achievements and prospects]. *Uspekhi khimii* [Achievements of chemistry], 2008, vol.77, pp. 242-269.
3. Vegera A.V., Zimon A.D. Sintez i fiziko-khimicheskie svoystva nanochastits serebra, stabilizirovannykh kislotnym zhelatinom. [Synthesis and physical-chemical properties of the silver nanoparticles stabilized by acid gelatin]. *Zhurnal prikladnoy khimii*. [Journal of applied chemistry], 2006, vol. 79, no. 10, pp. 1660-1663.
4. Saifullina I.R., Chiganova G.A., Karpov S.V., Slabko V.V. Poluchenie kompozitnykh plenok s nanochastitsami serebra i ikh fraktnymi agregatami v polimernoy matritse. [Producing composite films with silver nanoparticles and their fractal aggregates in a polymeric matrix]. *Zhurnal prikladnoy khimii*. [Journal of applied chemistry], 2006, vol. 79, no. 9, pp. 1419-1422.
5. Kremleva N.I., Kolyada L.G., Tarasyuk E.V., Efimova Yu.Yu. Poluchenie nanochastits serebra iz rastvorov [Producing silver nanoparticles from solutions] *Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya. Sb. dokl. mezhhregion. nauch.-tekhn. konferentsii* [Current problems of modern science, equipment and education. Collection of reports of the 70th interregional scientific and technical conference]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2012, vol. 1, pp. 199-202.
6. Kolyada L.G., Ershova O.V., Efimova Yu.Yu., Tarasyuk E.V. Sintez i issledovaniya nanochastits serebra. [Synthesis and research on silver nanoparticles]. *Almanakh sovremennoy nauki i obrazovaniya*. [Almanac of modern science and education], 2013, no 10(77), pp. 79-82.
7. Rhim J.-W., Hong S.-I., Park H.-M., W.Ng.J.P.K. Agric. Food Chem., 54, 5814 (2006).
8. GOST 3624-92. *Moloko i molochnye produkty. Titrimetricheskie metody opredeleniya kislotnosti* [State Standard 3624-92. Milk and dairy products. Titrimetric methods of acidity determination]. Moscow, Standartinform Publ., 1993. (In Russian).

Синтез и исследование наночастиц серебра и возможность их использования в пищевой упаковке / Коляда Л.Г., Медяник Н.Л., Ефимова Ю.Ю., Кремнева А.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №2. С. 65–69.

Kolyada L.G., Medyanik N.L., Efimova Yu.Yu., Kremneva A.V. Synthesis and research on silver nanoparticles and their possible application in food packaging. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 2, pp. 65–69.

СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

УДК 658.562.3

ОПЫТ ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА ЗАГОТОВКИ И СОРТОВОГО ПРОКАТА В СИСТЕМЕ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА (СМК) МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ЗАВОДА ХОСЕ МАРТИ (КУБА)

Тулупова Н.А.¹, Гуэрра Хосе Алонсо², Левандовский С.А.¹, Кинзин Д.И.¹, Саранча С.Ю.¹

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

² Металлургический завод Хосе Марти (José Martí), Куба

Аннотация. Для совершенствования и развития металлургических заводов необходимо постоянное решение вопроса управления качеством продукции. Рост качества производимой продукции является обязательной составляющей современного рынка металлопроката. В практике решения вопросов качества достаточно часто применяется подход к комплексной оценке состояния системы менеджмента качества посредством ауди-та. В данной статье рассматривается опыт проведения аудита системы менеджмента качества металлургического завода Хосе Марти и приводится информация о принятых на основе аудита решениях. В последующем планируется сотрудничество с этим предприятием в рамках его существенной реконструкции с целью повышения эффективности производства.

Ключевые слова: система менеджмента качества, технологический аудит, качество заготовки и готовой сортопрокатной продукции, контроль качества, сортовая прокатка.

Введение

В 2014 году промышленной группой ACINOX (Куба) было принято решение выполнить полный цикл предпроектных работ в составе технологического аудита завода Хосе Марти и разработки Обоснования инвестиций в модернизацию завода с целью повышению эффективности производства. Данный проект вошел в число приоритетных для финансирования в рамках межправительственной кредитной линии (Россия – Куба).

В сентябре 2014 года группа из 10 специалистов РФ (включая специалистов МГТУ им. Г.И. Носова) провела обследование (технологический аудит) металлургического завода Хосе Марти, имеющего в качестве основных технологических переделов производство стали из металлического лома на ДСП-70, непрерывную разливку сортовой заготовки (примерно поровну – переделной и товарной заготовки) и прокатку сортового проката (преимущественно арматуры) на станах 350 и 250. Одним из объектов аудита являлась система менеджмента качества (СМК) завода, а также методы и средства контроля качества продукции. Полученные тремя авторами статьи непосредственно на заводе Хосе Марти данные были позднее обработаны группой специалистов МГТУ, входящих в авторский коллектив [1–11].

В октябре 2014 года результаты аудита и полученные на их основе рекомендации были представлены руководству завода. Были проанализированы 4 варианта реконструкции (увеличение производства с действующих 120–130 тыс. т/год до величины от 210 до 420 тыс. т/год по жидкой стали и от 120 до 350 тыс. т/год по прокату в соответствии с техническим заданием на работу). В результате был выбран 4-й вариант реконструкции 420 тыс. т/год по жидкой стали и 350 тыс. т/год по прокату.

В данной статье представлены наиболее важные результаты технологического аудита в области контроля качества продукции и СМК и соответствующие рекомендации по развитию и совершенствованию управления качеством на заводе [3].

Исследование существующего состояния СМК и уровня контроля качества продукции

Исследование проводилось путем непосредственного наблюдения за процедурами СМК в цехах и лабораториях завода, а также анализа документов и исходных данных, сгруппированных по 18 позициям (в частности, перечень измерительного оборудования лабораторий, результаты внутреннего аудита за 2014 г., выдержки из отчета по качеству о количестве дефектов (в тоннах) за 2013 по сталеплавильному цеху и

по прокатным цехам, процедура «Управление несоответствующей продукцией» и др.).

В ходе выборочного аудита было установлено следующее.

На заводе разработана и внедрена система менеджмента качества (СМК), она в достаточной степени документирована и прошла сертификацию в 2010 г. на соответствие международному стандарту ИСО 9001:2008 в государственном органе (бюро) по стандартизации (сертификат от 13.07.2010 г.) и в международном бюро «Bureau Veritas» (сертификат 13.04.2010 г.), однако данные сертификаты уже не действуют. Специалистами завода готовится «пересертификация» СМК в 2015 г.

При этом не выявлено, что один из наиболее важных документов СМК – Руководство по качеству (Manual de la Calidad), отражающих структурную схему СМК – порядок, последовательность, взаимосвязи процессов, номенклатуру документации СМК, организационную структуру завода (укрупненно), является управляемым документом, т.е. не установлено кто его разрабатывает, согласовывает, утверждает, когда пересматривают, как его учитывают, вносятся изменения и другие процедуры, позволяющие иметь актуальную редакцию.

На предприятии имеется «Отдел управления качеством», который координирует деятельность по документированию СМК, организации работ по качеству и контролю качества. В ходе исследования не выявлено, что представляет собой документ, являющийся результатом ревизии СМК со стороны руководства, и как оценивается выполнение решений предыдущей ревизии. Не выявлено наличие в СМК таких документов, как «Приказы по качеству».

Отчеты по качеству за 2013, 2014 гг. отражают неполную картину видов и количества дефектов продукции. Например, не представлены данные по такому дефекту заготовок, как пузыри (поры), хотя, по словам сотрудников, они составляют весомую долю.

Следует отметить, что многие процессы СМК фактически действуют только для экспортной продукции (только для заготовки). Таким образом, производство проката не полностью управляется СМК.

СМК завода не предусматривает наличия таких документов, как Должностные (рабочие) инструкции, что затрудняет для вновь поступивших работников понимание того, какие должностные и функциональные обязанности и права за ним закреплены.

На предприятии имеется документ, описывающий работу с несоответствующей продукцией – Р-08-03 «Контроль несоответствующей продукции». Однако вызывало сомнение возможность и корректность отнесения продукции к годной или

несоответствующей, так как контролеры качества на своих рабочих местах при определении качественных характеристик продукции зачастую используют только визуальный осмотр. Средства измерений если и имеются, то не находятся «в режиме использования», т.е. их нет в наличии у контролера при осуществлении контроля параметров.

В момент проведения аудита на «точке контроля» в сталеплавильном цехе контролера на посту не оказалось, соответственно не представлялось возможным оценить его работу, в том числе с документацией, которую он должен заполнять. Самого рабочего места также представлено не было, как и, впрочем, документов, регистрирующих показатели качества заготовок. Однако отмечалось, что имеется документ, где фиксируются показатели качества и который отправляется в главный «офис качества».

Склад – место, где хранится несоответствующая продукция, представлен к осмотру для аудита не был.

Процесс маркировки годной и несоответствующей продукции ведется следующим образом: на заготовках мелом указывается номер плавки, марка стали, длина, количество штук в партии. Если заготовка, бракованная – ее помечают знаком «Х». Однако годные и несоответствующие заготовки находятся очень близко друг к другу – вероятность возникновения «путаницы» с попаданием бракованных заготовок в прокатку или отгрузку в условиях производства очень велика.

Для идентификации готового проката используется система «бирок». Контролер разделяет продукцию на: годную, 2 сорт, 3 сорт, несоответствующую и экспортную. Для последней заполняется специальная сопроводительная карточка, для остальной – закрепляется бирка.

Не получено внятных пояснений по каким именно показателям продукцию относят к более низкому сорту и в каком документе это прописано.

Проверяют 100% продукции, поставляемой на экспорт, и 10% продукции из партии, идущей в прокатные цеха.

Для экспортируемой продукции специалист инспектора заполняет «лист передачи» (сертификат качества), в котором указаны следующие данные: страна-заказчик, геометрические размеры, марка стали, номер плавки, количество заготовок, общий вес, стоимость в песо. Данный документ скреплен печатью. Аналогичный документ заполняется для годной продукции.

В СМК существуют журналы, которые ведут разные рабочие – регистры [4,5]. В них заносятся результаты их производственной деятельности или деятельности подразделения. По факту оказалось, что многие из таких регистров заполнены не в полной мере – многие строки/столбцы пустые; некоторые журналы вообще отсутствуют на рабочем

месте (на момент аудита); некоторые повторяют информацию с других документов.

Большую сложность представляет передача данных по результатам деятельности подразделений другим подразделениям, одна и та же информация дублируется в разных документах, а скорость передачи данных и значимой информации очень низкая. В лучшем случае данные передаются по телефону, в худшем – доставляются пешком в пункт назначения. Крайне отрицательно сказывается отсутствие электронного документооборота.

В ходе технологического аудита проверялись лаборатории химанализа, мехиспытаний и металлографии. Цели в области качества каждой из трех лабораторий не установлены. Видимых признаков калибровки или поверки испытательного-измерительного оборудования всех лабораторий обнаружено не было. Периодичность калибровки и поверки персонал не знает, но в СМК имеется документ, который регулирует деятельность по калибровке средств измерений и испытательного оборудования.

Установлено, что из трех лабораторий контроля (химанализа, мехиспытаний и металлографии) фактически работает только одна – лаборатория химанализа. Работа остальных лабораторий вызывает сомнения в связи с состоянием измерительного оборудования и отсутствием признаков его регулярного использования.

Анализ качества продукции

Статистические методы для обработки и анализа информации практически не используются, за исключением простейших диаграмм.

Полученные из разных источников на заводе данные о практических методиках фиксации видов брака и анализа причин брака не совпадают. Вызывает тревогу то, что даже при фиксации видов брака и определении причин их возникновения не получено четких ответов об организации корректирующих и предупреждающих действий.

Выборочная проверка практической работы участка контроля на стане 250 показала: практическая работа по контролю качества ведется. Нормативная документация, по которой работают контролеры, предоставлена на каждый вид продукции. Измеряемые дефекты профиля (диаметр, высота ребра, продольное ребро и т.д.) оцениваются на рабочем месте контролера визуальным методом и с помощью таких средств измерения, как штангенциркуль, весы. Пробы отбираются согласно методике отбора. Документация, отражающая результаты работы персонала (записи по качеству), была представлена – Журнал контроля характеристик качества. Процесс идентификации продукции происходит своевременно – контролер разделяет продукцию на годную, 2 сорт, 3 сорт, несоответствующую и экспортную – вешается бирка. Место, где

хранится несоответствующая продукция не представлено. Заполненную документацию по результатам контроля на участке и отобранные пробы контролер пешком передает в лабораторию. Оперативный вывод: система контроля на стане 250 удовлетворительна.

Оценка качества заготовок и проката была проведена методом систематизации данных, содержащихся в таблицах из отчетов по качеству 2013–2014 гг. и представления в виде графиков (рис. 1–6).

Из графиков на рис. 1–3 обнаруженных дефектов за 2013 и 2014 гг. видно, что основными проблемами при производстве заготовки являются вопросы обеспечения геометрии и обеспечения длины заготовок при порезке на мерные длины, что связано с низким технико-технологическим уровнем существующего производства. Несмотря на снижение дефектов в 2014 г., использование предприятием информации о качестве заготовок является не полным. Так, для эффективного контроля необходимо применять более широкий спектр показателей качества, в частности: химический состав, дефекты разлива (как внешние, так и внутренние) с балльной системой оценки, оценка внутренних свойств заготовок, таких как неравномерность распределения химических элементов по сечению.

Следует отметить несоответствие информации специалистов, считающих основными видами брака по заготовке ромбовидность и поры (пузыри), и данных отчетов по качеству, где это не отражено.

Информация, представленная предприятием, о часто встречающихся дефектах прокатной продукции (рис. 4–6) позволяет убедиться в том, что на действующих прокатных станах имеется недостаточный контроль качества готовой продукции.

В частности, видно, что тремя ключевыми проблемами производства проката являются: проблемы с соблюдением итоговой формы (геометрии) раската [6, 7]; проблемы с организацией производства продукции заданной мерной длины и отбраковка во второй сорт [8, 9].

Из отчета по качеству прокатных цехов не следует анализ брака по механическим свойствам (пределу текучести, пределу прочности, относительному удлинению и т.д.). Не ясно, как используются результаты измерений этих параметров, которые, по словам специалистов лаборатории, проводятся.

Многие задачи контроля качества заготовки и готового проката не решены на предприятии по причине отсутствия возможности проведения отдельных испытаний, отсутствия необходимого опыта. Все эти задачи можно решить посредством комплексной модернизации производства, лабораторий и системы менеджмента качества.

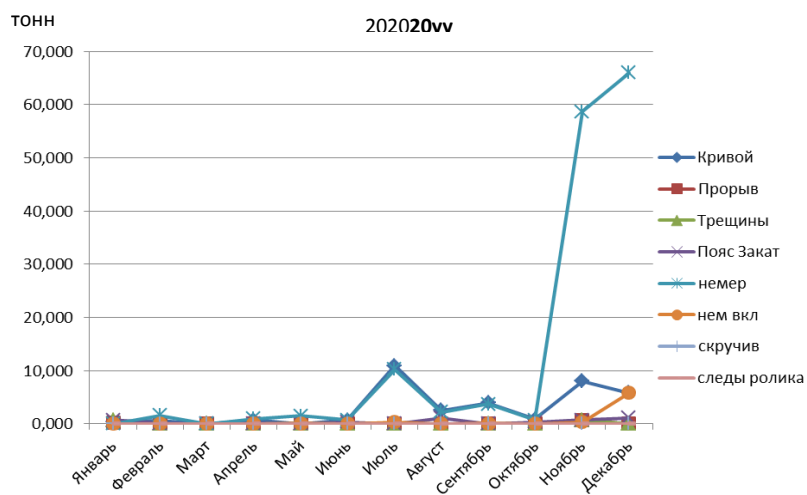


Рис. 1. Виды дефектов непрерывно-литых заготовок и тоннаж дефектных заготовок на примере производственных данных 2013 г.

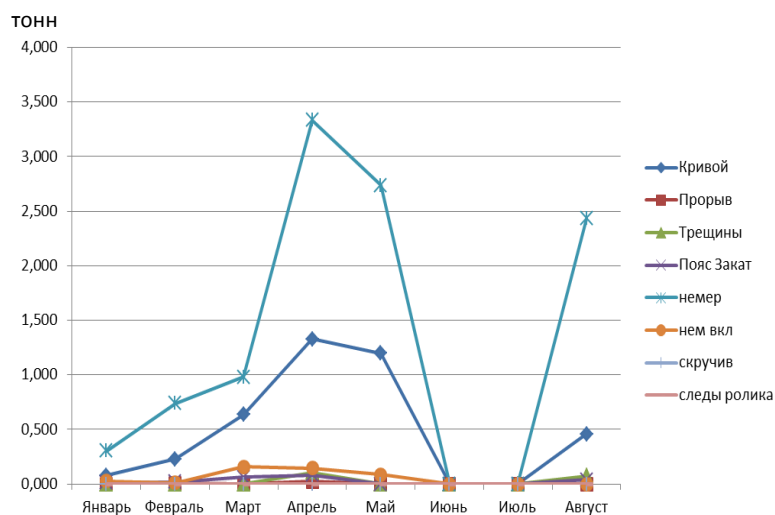


Рис. 2. Виды дефектов непрерывно-литых заготовок и тоннаж дефектных заготовок на примере производственных данных восьми месяцев 2014 г.

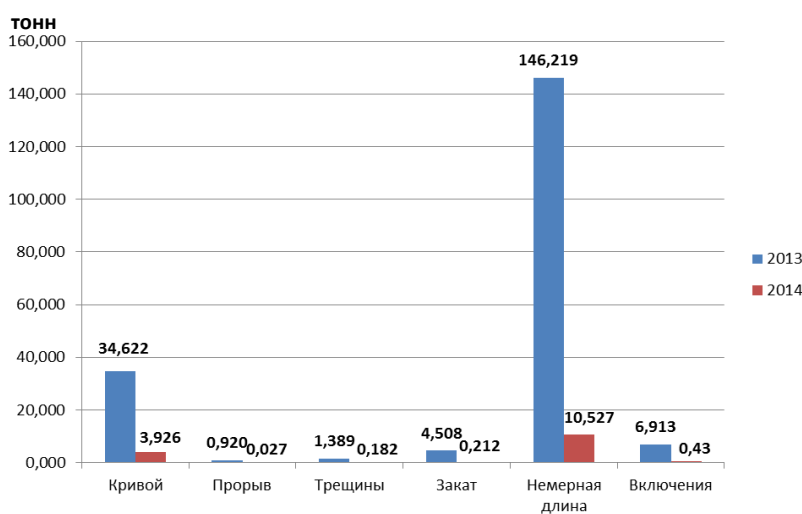


Рис. 3. Сравнительный анализ количества учитываемых дефектов непрерывно-литых заготовок и тоннаж дефектных заготовок в 2013 и 2014 гг.

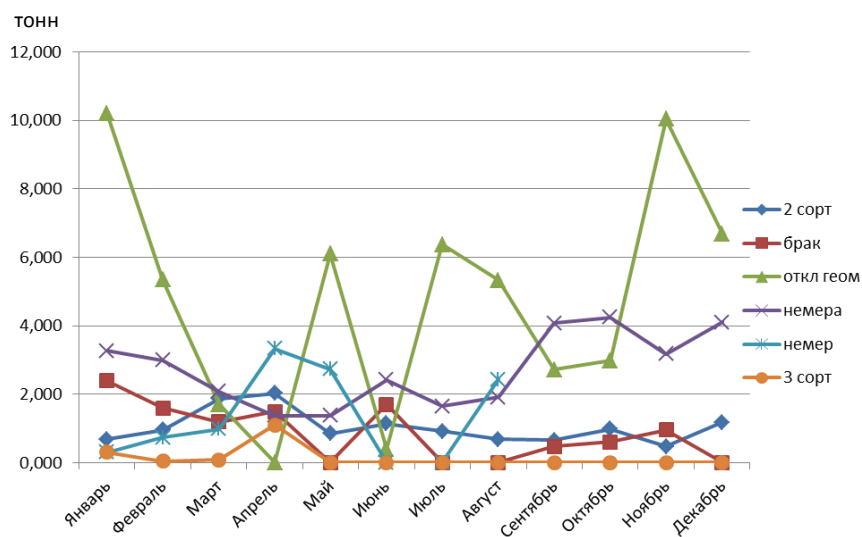


Рис. 4. Виды дефектов готового проката и тоннаж дефектной продукции на примере производственных данных 2013 г.

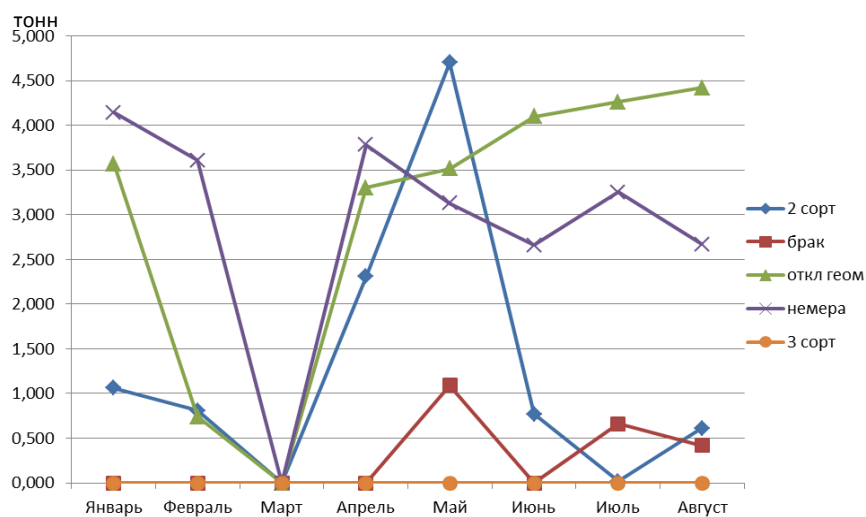


Рис. 5. Виды дефектов готового проката и тоннаж дефектной продукции на примере производственных данных восьми месяцев 2014 г.

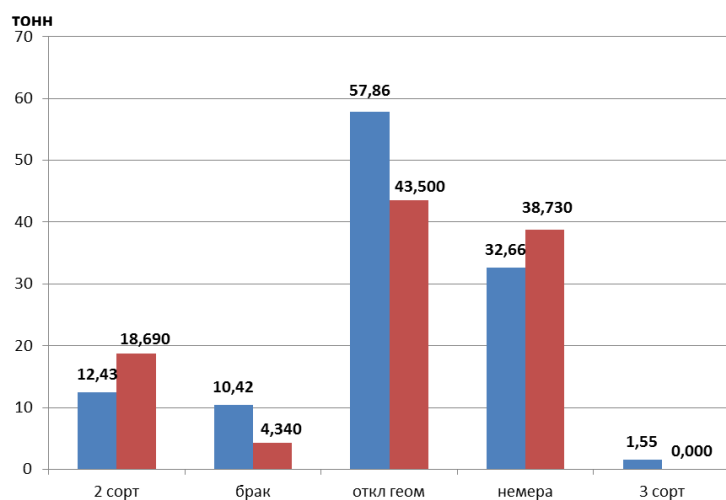


Рис. 6. Сравнительный анализ количества учитываемых дефектов готового проката и тоннаж дефектной продукции в 2013 и 2014 гг.

Пути совершенствования контроля качества и организации СМК на заводе Хосе Марти

Учитывая выбранный вариант модернизации завода (4-й вариант: 420 тыс. т в год жидкой стали и 350 тысяч т в год производимого проката) следует рассмотреть следующий перечень мероприятий.

Совершенствование системы менеджмента качества предприятия

- Руководству предприятия взять под контроль:
 - получение действующего сертификата на соответствие СМК стандарту ИСО 9001, а также получение действующих сертификатов на продукцию;
 - актуализацию целей в области качества подразделений и всего предприятия.
- Усовершенствовать:
 - систему актуализации внутренних и внешних документов;
 - систему контроля продукции увеличением доли проверяемой продукции;
 - парк контрольно-измерительного оборудования (или заменить целиком);
 - систему выявления свидетельств поверки/калибровки средств измерения и испытательного оборудования для обеспечения её прозрачности;
 - систему управления несоответствующей продукцией;
 - процесс проверки компетентности контролеров по качеству и знания ими нормативной документации увеличением частоты проверки;
 - систему повышения заинтересованности и вовлеченности работников в процессы обеспечения и совершенствования качества продукции;
 - процесс «Закупки», возможно, ужесточить оценку поставщика.
- Разработать и внедрить:
 - форму «Протокол ознакомления с политикой в области качества»;
 - отчётный документ о ревизии СМК со стороны руководства;
 - форму «Приказы по качеству»;
 - должностные (рабочие) инструкции (с привлечением самих работников);
 - полноценную систему электронного документооборота;
 - систему отслеживания и выполнения корректирующих действий по результатам внутренних аудитов;
 - практику оценки причин возникновения того или иного вида дефекта.
- Привнести в документы:
 - признаки управляемости и обратной связи (подписи, печати, даты утверждения, фамилии разработчиков и ответственных за процесс и т.п.);
 - требования к использованию системы контроля качества производственных процессов;

○ относящиеся к отчётам по качеству большую объективность и возможность отслеживания реакции на сформированные замечания.

- Исключить:
 - дублирование одной и той же информации в разных формах документов;
 - передачу данных между цехами и лабораториями в формате «пешком»;
 - боязнь наказания за несоответствия, выявленные во внутренних аудитах.
- Рекомендовать заказчику:
 - принять меры по повышению объективности отчёта по качеству;
 - разработать и внедрить систему обнаружения, учета и классификации видов брака и его причин.

При условии внедрения нового производственного цеха и соответствующего уровня оборудования и технологии необходимо:

- определить, идентифицировать и описать все новые процессы;
- разработать комплекс необходимой документации для каждого процесса, каждой операции, каждой процедуры;
- распределить ответственность в области качества;
- внести изменения в структуру документации СМК и организационную структуру предприятия;
- обучить персонал новым методам контроля и ведения отчетности;
- расширить область использования инструментов управления качеством.

Модернизация лабораторий

При подготовке производства стали важно знать показатели качества сырья (лома, шихты и т.п.). В процессе производства стали необходимо вести текущий контроль. После разливки необходимо убедиться в химическом составе стали, состоянии дефектов разливки, механических и металлографических свойствах. Для этого нужно более эффективно использовать имеющееся [10, 11] и, при необходимости, подобрать дополнительное испытательное оборудование. Рассмотрим особенности совершенствования лабораторной базы предприятия при модернизации производства.

Для всего работающего в лаборатории инженерного персонала будет необходимо провести дополнительное обучение.

Лаборатория химического состава.

Лаборатория предприятия на данный момент имеет спектрометр атомной абсорбции. Однако на современных предприятиях рекомендуется применять не только спектральный, но и эмиссионный анализ.

Входной контроль на данном этапе должен:

- включать исследование: сырья (лома или

руды), раскислителей, шлака, легирующих элементов, угля и прочее;

- проводиться для готовой продукции (слябов) не зависимо от её дальнейшего применения (прокатки на станах или продажи слябов покупателям) [12].

Рекомендуется рассмотреть возможность приобретения портативных приборов химического анализа для повышения контроля качества производимой продукции.

Лаборатория металлографии

В случае преобладания (по объёмам производства) продукции в виде стального проката необходимо обеспечивать качественный металлографический контроль.

Для этого необходимо: отремонтировать и настроить существующий металлографический микроскоп или купить новый; приобрести программное обеспечения (ПО) для автоматизации процесса оценки фазовых состояний металла; систематизировать процесс хранения информации с требованиями нормативных документов различных уровней; для контроля дефектов разлива рекомендуется приобрести ПО, предназначенное для установления балльности дефектов, что позволит снять эту задачу с человека.

Лаборатория механических испытаний

Основной объём испытаний механических свойств будет возлагаться на готовый стальной прокат. Рекомендации для улучшения функционирования лаборатории:

- для оценок механических свойств необходимо иметь: измеритель(и) твёрдости для различных шкал твёрдости, машину для испытаний на ударную вязкость;
- заменить устаревшую разрывную машину (20–50 т) и регулярно следить за работоспособностью и точностью существующей машины китайского производства;
- производить регулярную поверку и калибровку испытательного оборудования;
- вести строгий учет всех производимых испытаний продукции.

Рекомендации по контролю качества

Объём продукции, производимой станами после планируемой реконструкции, будет 74,2 и 83,3% (от объёма 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 слябов,

производимых 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 [13] на всех стадиях его производства. Для этого необходимо ввести строгую дисциплину по учёту и маркировке проката, синхронизированную с корпоративной информационной системой.

Развитие 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);
- для поиска корреляций между параметрами рекомендуется использовать корреляционный анализ, парный и множественный регрессионный анализ;
- для проведения эффективного выборочного контроля по количественным и качественным признакам необходимо обучить этому персонал лабораторий;
- для оценивания выхода несоответствующей продукции можно применять статистический подход на основе распределения Гаусса;
- для предсказания 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 качественные исходные данные.

Заключение

Проект модернизации завода Хосе Марти, получивший в апреле 2015 года одобрение Межправительственной комиссии «Россия – Куба» и включенный в число проектов, финансируемых в рамках кредитной линии, предоставляемой Российской Федерацией, имеет хорошую перспективу для реализации программы технического и технологического перевооружения и реализации всех вышеописанных мероприятий,

направленных на улучшение качества продукции при увеличении объемов производства.

Список литературы

1. Совершенствование существующих технологических схем прокатки на основе оптимизации форм калибров с целью повышения качества сортовой продукции / Левандовский С.А., Моллер А.Б., Назаров Д.В., Зайцев А.А. // Моделирование и развитие процессов ОМД. 2006. № 1. С. 129–137.
2. Использование адаптивной структурно-матричной модели для управления качеством сортового проката с разработкой рациональных предупреждающих действий / Моллер А.Б., Ручинская Н.А., Зайцев А.А., Тулупов О.Н., Луценко А.Н. // Неделя металлов в Москве: сборник трудов конференций и семинаров; редкол.: Сивак Б.А. и др. Москва, 2007. С. 357–367.
3. Совершенствование сортопрокатных технологических систем через развитие элементов менеджмента качества / Моллер А.Б., Левандовский С.А., Ручинская Н.А., Лимарев А.С., Симаков Ю.В., Логинов А.В., Назаров Д.В., Колясов Д.В. // Труды Восьмого конгресса прокатчиков. 2010. С. 224–229.
4. Колокольцев В.М. Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. История. Развитие // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. №1(45). С. 5–6.
5. Колокольцев В.М., Разинкина Е.М. Университетский комплекс: интеграция и непрерывность // Высшее образование в России. 2011. №5. С. 3–10.
6. Подготовка квалифицированных кадров в условиях университетского комплекса / Колокольцев В.М., Разинкина Е.М., Глухова А.Ю. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2010. Т. 12. №1–2. С. 615–618.
7. Колокольцев В.М. Пять лет от аттестации до аттестации // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2008. №1. С. 5–11.
8. 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.
9. Metallurgy quality theory design and development / Gun G.S., Rubin G.Sh., Chukin M.V., Gun I.G., Mezin I.Yu., Korchnov A.G. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. №5(45). С. 67–69.
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. 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.
12. Разработка технологических методов управления качеством сортового проката на основе эффективного использования информационных моделей / Ручинская Н.А., Моллер А.Б., Тулупов О.Н., Зайцев О.Ю. // Труды VII Конгресса прокатчиков. Москва, 2007. С. 197–203.
13. Информационные технологии как инструмент управления качеством раскрытия готовой продукции и эффективностью сортопрокатного производства / Саранча С.Ю., Левандовский С.А., Стаценко Ю.С., Моллер А.Б. // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2014. № 4. С. 54–56.
14. Левандовский С.А., Моллер А.Б., Тулупов О.Н. Оптимизация режимов формоизменения на современных непрерывных сортовых станах // Наука и производство Урала. 2005. С. 55.
15. Совершенствование калибровки валков для прокатки круглых и арматурных профилей / Асанов В.Н., Стеблов А.В., Тулупов О.Н., Ленартович Д.В. // Сталь. 2008. № 11. С. 90–91.
16. Разработка и применение баз данных технологических параметров с целью освоения и совершенствования современных сортопрокатных станков / Левандовский С.А., Назаров Д.В., Лимарев А.С., Моллер А.Б., Тулупов О.Н. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2005. №4 (12). С. 36–40.
17. Тулупов О.Н., Кинзин Д.И. Калибровка простых сортовых профилей как решение задачи оптимального управления // Труды Восьмого конгресса прокатчиков. 2010. С. 230–235.
18. Кинзин Д.И., Рычков С.С. Оценка эффективности калибровки сортовых профилей на основе программного комплекса DEFORM-3D // Моделирование и развитие процессов ОМД. 2011. № 1. С. 92–95.
19. Моделирование технологических возможностей стана 300-3 ОАО «ММК» и рационального использования валковых шайб при прокатке катанки из широкого марочного сортамента сталей / Тулупов О.Н., Моллер А.Б., Кинзин Д.И., Колясов Д.В., Завьялов А.А., Симаков Ю.В. // Моделирование и развитие процессов ОМД. 2002. № 1. С. 208–213.
20. Применение показателя соответствия профиля при управлении качеством продукции сортовых станков / Луценко А.Н., Монид В.А., Тулупов О.Н., Ручинская Н.А., Лимарев А.С., Ищенко К.А. // Труды VII Конгресса прокатчиков. Москва, 2007. С. 221–228.
21. Structural-matrix models for long product rolling processes modeling production traceability and forming consumer properties of products / Tulupov O.N., Moller A.B., Kinzin D.I., Levandovskiy S.A., Ruchinskaya N.A., Nalivaiko A.V., Rychkov S.S., Ishmetyev E.N. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. № 5 (45). С. 46–50.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

EXPERIENCE OF RESEARCH OF THE BILLETS AND LONG PRODUCTS QUALITY IN THE QUALITY MANAGEMENT SYSTEM AT THE JOSÉ MARTÍ METALLURGICAL PLANT (CUBA)

Tulupova Nataliya Aleksandrovna – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7 (3519) 298 525. E-mail: nata_russkaja@mail.ru.

Guerra José Alonso – Deputy General Director of the José Martí Metallurgical Plant (Cuba).

Levandovskiy Sergey Anatolievich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7 (3519) 298 525. E-mail: levandovskiy@mail.ru.

Kinzin Dmitriy Ivanovich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7 (3519) 298 525. E-mail: kinzin@mail.ru.

Sarancha Sergey Yurievich – Postgraduate Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7 (3519) 298 525.

Abstract. To improve and develop metallurgical plants, it is required to continuously settle an issue on product quality control. The growth of the product quality is an essential part of a modern steel products market. In practice, quality issues are often settled by applying an integrated evaluation of the quality management system through audits. The article deals with experience of a quality management system audit at the Jose Marti Metallurgical Plant and provides information about solutions adopted as a result of such audit. In future we intend to cooperate with this plant as part of its significant revamping to increase its production efficiency.

Keywords: Quality management system, process audit, quality of billets and finished long products, quality control, section rolling.

References

1. Levandovskiy S.A., Moller A.B., Nazarov D.V., Zaitsev A.A. Sovershenstvovanie sushchestvuyushchikh tekhnologicheskikh skhem prokatki na osnove optimizatsii form kalibrov s tselyu povysheniya kachestva sortovoy produktsii [Improvement of existing rolling schedules by optimizing a pass design to improve the quality of long products]. *Modelirovanie i razvitie protsessov OMD* [Simulation and development of metal forming processes], 2006, no. 1, pp. 129-137.
2. Moller A.B., Ruchinskaya N.A., Zaitsev A.A., Tulupov O.N., Lutsenko A.N. Ispolzovanie adaptivnoy strukturno-matrichnoy modeli dlya upravleniya kachestvom sortovogo prokata s razrabotkoy ratsionalnykh preduprezhdayushchikh deystviy [Using an adaptive structural matrix model for long products quality control, including development of reasonable preventive measures]. *Nedelya metallov v Moskve sbornik trudov Konferentsiy i Seminarov. redkol. : Sivak B. A. i dr.* [A collection of papers presented at conferences and seminars at the Moscow Metal Week. The editorial staff includes Sivak B. A. et al.]. Moscow, 2007, pp. 357-367.
3. Moller A.B., Levandovskiy S. A., Ruchinskaya N. A., Limarev A. S., Simakov Yu.V., Loginov A.V., Nazarov D. V., Kolyasov D. V. Sovershenstvovanie sortoprokatnykh tekhnologicheskikh sistem cherez razvitie elementov menedzhmenta kachestva [Improved rolling technology systems through the development of elements of quality management]. *Trudy Vos'mogo kongressa prokatchikov* [Proceedings of the 8th Congress of Rolling Mill Engineers], 2010, pp. 224-229.
4. Kolokoltsev V.M. Nosov Magnitogorsk State Technical University. History. Development. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2014, no. 1(45), pp. 5-6.
5. Kolokoltsev V.M., Razinkina E.M. A university complex: integration and steadiness. *Higher education in Russia*, 2011, no. 5, pp. 3-10.
6. Kolokoltsev V.M., Razinkina E.M., Glukhova A.Yu. Training of qualified personnel at a university complex. *News of the Samara Research Centre of the Russian Academy of Sciences*, 2010, vol. 12, no. 1-2, pp. 615-618.
7. Kolokoltsev V.M. Five years from a performance review to another one. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2008, no. 1, pp. 5-11.
8. Gun G.S., Mezin I.Yu., Korchunov A.G., Chukin M.V., Gun I.G., Rubin G.Sh. The Magnitogorsk State Technical University school of science and education on product and process quality control. *Quality in material processing*, 2014, no. 1, pp. 5-9.
9. Gun G.S., Rubin G.Sh., Chukin M.V., Gun I.G., Mezin I.Yu., Korchunov A.G. Metallurgy qualimetry theory design and development. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2013, no. 5(45), pp. 67-69.
10. Rubin G.Sh., Chukin M.V., Gun G.S., Zakirov D.M., Gun I.G. Development of the theory of metalware qualimetry. *Ferrous metals*, 2012, no. 7, pp. 15-20.
11. Gun G.S., Rubin G.Sh., Chukin M.V., Gun I.G., Mezin I.Yu., Korchunov A.G. Metallurgy qualimetry theory design and development. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2003, no. 5, pp. 67.
12. Ruchinskaya N.A., Moller A.B., Tulupov O.N., Zaitsev O.Yu. Razrabotka tekhnologicheskikh metodov upravleniya kachestvom sortovogo prokata na osnove effektivnogo ispolzovaniya informatsionnykh modeley [Development of technological methods of quality control of long products through the efficient use of information models]. *Trudy VII Kongressa prokatchikov* [Proceedings of the 7th Congress of Rolling Mill Engineers], Moscow, 2007, pp. 197-203.
13. Sarancha S.Yu., Levandovskiy S.A., Statsenko Yu.S., Moller A.B. Informatsionnye tekhnologii kak instrument upravleniya kachestvom raskroya gotovoy produktsii i effektivnostyu sortoprokatnogo proizvodstva [Information technology as a management tool for cutting finished products and efficiency of section mills]. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyi nauchnyi zhurnal* [Mechanical Engineering: Network Electronic Scientific Journal], 2014, no. 4, pp. 54-56.
14. Levandovskiy S. A., Moller A. B., Tulupov O.N. Optimizatsiya rezhimov formoizmeneniya na sovremennykh nepreryvnykh sortovykh stanakh [Optimization of the modes of forming on modern continuous section mills]. *Naukam proizvodstvo Urals* [Science and production in the Urals], 2005, p. 55.
15. Asanov V.N., Steblov A.V., Tulupov O.N., Lenartovich D.V. Sovershenstvovanie kalibrovki valkov dlya prokatki kruglykh i armaturnykh profiley [An improved roll pass design for rolling round and rebar products]. *Stal'* [Steel], 2008, no. 11, pp. 90-91.
16. Levandovskiy S.A., Nazarov D.V., Limarev A.S., Moller A.B., Tulupov O.N. Razrabotka i primeneniye baz dannykh tekhnologicheskikh parametrov s tselyu osvoeniya i sovershenstvovaniya sovremennykh sortoprokatnykh stanov [Development and use of databases of technological process parameters to develop and improve modern section rolling mills]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2005, no. 4 (12), pp. 36-40.
17. Tulupov O.N., Kinzin D.I. Kalibrovka prostykh sortovykh profiley kak reshenie zadachi optimalnogo upravleniya [A roll pass design of simple section bars as a solution to optimal control problems]. *Trudy Vos'mogo kongressa prokatchikov* [Proceedings of the 8th Congress of Rolling Mill Engineers]. 2010, pp. 230-235.
18. Kinzin D.I., Rychkov S.S. Otsenka effektivnosti kalibrovki sortovykh profiley na osnove programmnogo kompleksa DEFORM-3D [Evaluation of the roll pass design efficiency based on software package DEFORM-3D]. *Modelirovanie i razvitie protsessov OMD* [Simulation and development of metal forming processes], 2011, no. 1, pp. 92-95.
19. Tulupov O.N., Moller A.B., Kinzin D.I., Kolyasov D.V., Zavyalov A.A., Simakov Yu.V. Modelirovanie tekhnologicheskikh vozmozhnostey stana 300-3 OAO «MMK» i ratsionalnogo ispolzovaniya valkovykh shaib pri prokatke katanki iz shirokogo marochnogo sortamenta staley [Modeling technological capabilities of mill 300-3 at OJSC MMK and a rational use of rolling rings, when rolling wire rods of a wide range of steel grades]. *Modelirovanie i razvitie protsessov OMD* [Simulation and development of metal forming processes], 2002, no. 1, pp. 208-213.

20. Lutsenko A.N., Monid V.A., Tulupov O.N., Ruchinskaya N.A., Limarev A.S., Ishchenko K.A. Primenenie pokazatelya sootvetstviya profilya pri upravlenii kachestvom produktsii sortovykh stanov [Using indicators of compliance with a shape in product quality control of section rolling mills]. *Proceedings of the 7th Congress of Rolling Mill Engineers*, Moscow, 2007, pp. 221-228.
21. Tulupov O.N., Moller A.B., Kinzin D.I., Levandovskiy S.A., Ruchinskaya N.A., Nalivaiko A.V., Rychkov S.S., Ishmetiev E.N. Structural-matrix models for long product rolling processes modeling production traceability and forming consumer properties of products. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2013, no. 5(45), pp. 46-50.

Опыт исследования качества заготовки и сортового проката в системе менеджмента качества (СМК) металлургического завода Хосе Марти (Куба) / Тулупова Н.А., Гуэрра Хосе Алонсо, Левандовский С.А., Кинзин Д.И., Саранча С.Ю. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №2. С. 70–79.

Tulupova N.A., Guerra José Alonso, Levandovskiy S.A., Kinzin D.I., Sarancha S.Yu. Experience of research of the billets and long products quality in the quality management system at the José Martí metallurgical plant (Cuba). *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 2, pp. 70–79.

УДК 006.05

ПОИСК КОНСЕНСУСА МЕЖДУ ПОТРЕБИТЕЛЕМ И ПРОИЗВОДИТЕЛЕМ – ВАЖНЫЙ ЭТАП ПРИ РАЗРАБОТКЕ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ

Данилова Ю.В., Полякова М.А., Рубин Г.Ш.

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

Аннотация. Предложен алгоритм процедуры сближения позиций потребителя и изготовителя, основанный на использовании функционально-целевого анализа и подходов квалитметрии для установления взаимосвязи потребительских функций и требований нормативных документов на продукцию. В качестве примера выбран один из распространенных видов метизов – болт машиностроительный. Установлено, что одно свойство болта может обеспечивать выполнение различных потребительских функций. Это следует учитывать производителю металлопродукции. Предлагаемый подход позволяет сократить время поиска компромиссных решений на первой стадии разработки стандартов – поиска консенсуса между потребителем и производителем. Разработанный алгоритм является универсальным и может быть использован для любых видов продукции.

Ключевые слова: стандартизация, научные основы, протипология, стандарт, потребительские функции, требования изготовителя, консенсус, болт машиностроительный.

Введение

Стандартизация рассматривается как практическая деятельность и как часть системы управления. Стандартизация как практическая деятельность заключается в разработке, внедрении и применении нормативных документов и надзоре за выполнением требований, правил и норм, изложенных в них [1]. Стандартизация как составная часть управления опирается на комплекс основополагающих документов в области технической политики и управления качеством продукции. В последнее время созрело понимание, что стандартизация выделяется не только практической деятельностью и частью системы управления, но и отдельным научным направлением. Стандартизация как наука выявляет, обобщает и анализирует закономерности, влияющие на те или другие изменения качества товара, развивает и обосновывает нормы и требования к объектам стандартизации [2]. Но стандартизация, прежде всего, система идей, принципов, методов, правил, норм, которые образуют научно-

теоретические основы стандартизации; совокупность документов по стандартизации – в первую очередь стандартов, создаваемых на основе этих идей и методов. Таким образом, одним из важнейших условий развития стандартизации является дальнейшая разработка ее научных основ, решение большого числа крупных и сложных теоретических проблем технического, экономического, социального и правового характера, определяющих стандартизацию как науку [3–5].

Методы исследования

Одной из обширнейших сфер стандартизации является разработка стандартов на промышленную продукцию. Обычным методом решения таких задач является серия переговоров между потребителями и производителями, приводящая к согласованию стандарта как компромисса между сторонами. Отметим проблемы, которые решаются при этом.

Первое. Потребитель формулирует требования к продукции в виде потребительских свойств, а изготовитель должен при производ-

стве продукции руководствоваться конкретными физико-химическими, геометрическими и другими измеряемыми показателями.

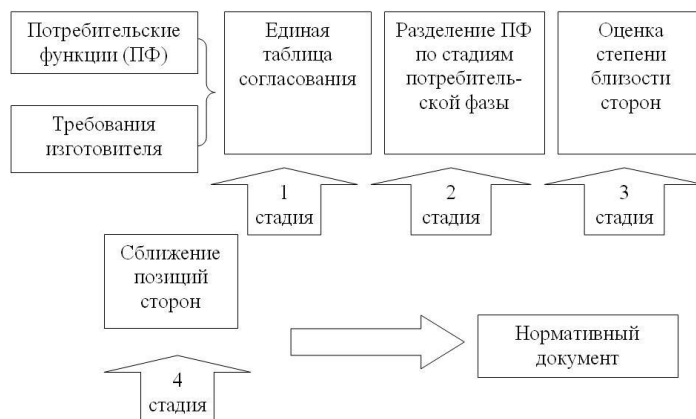
Второе. Конкретный стандарт согласовывается как оптимальное сочетание требования потребителя и возможностей изготовителя. Однако принципы оптимизации в настоящее время не разработаны, а только интегрировано выражены в тезисе о недопустимости создания препятствий производству и обращению продукции, выполнению работ и оказанию услуг в большей степени, чем это минимально необходимо для выполнения целей из статьи 11 Федерального закона «О техническом регулировании». Для устранения данной проблемы необходимо ввести такую процедуру, как реальное согласование интересов сторон с помощью метода согласования через функцию оценки качества как целевой функции оптимизации. Это приведет к использованию общепринятых нормативных документов в производстве, устранению международных барьеров в торговле, а также к взаимопониманию между поставщиками и покупателями.

Исходя из этого, на пути развития научных основ стандартизации необходимо решить задачу разработки методов трансформации потребительских свойств изделия в нормируемые показатели изготовителя. Одним из перспективных на этом пути наряду с методами QFD является метод функционально-целевого анализа [6]. Тогда сближение позиций потребителя и изготовителя можно будет сформулировать как задачу оптимизации в пространстве свойств изделий с комплексной оценкой качества как целевой функции.

Значительная часть стандартизации – это согласование позиций потребителя и изготовителя. В соответствии с ФЗ «О техническом регулировании» для реализации целей стандартизации предусмотрено решение основных задач, причем одной из первых является обеспечение взаимопонимания между разработчиками, изготовителями, продавцами и потребителями (заказчиками) продукции и услуг. Стандарты являются средством достижения данного согласия. Необходимость создания нового аппарата стандартизации, который будет приводить к консенсусу требования потребителей и возможности изготовителей, назрела давно.

На рисунке представлены стадии процесса согласования позиций потребителя и изготовителя. На первом этапе предлагается все требования потребителя (далее потребительские функции (ПФ)) и требования (возможности) изготовителя продукции объединить в единую таблицу. Далее целесообразно разделить ПФ по стадиям потребительской фазы, используя метод функционально-

целевого анализа [7, 8]. Количественная оценка степени близости позиций сторон проводится на основе квалитетической оценки качества продукции [9–11]. Это позволяет перейти к завершающей стадии – сближения позиций сторон путём выбора компромиссного для сторон уровня параметров продукции. Следует заметить, что данный подход универсальный, может использоваться для любого вида металлопродукции.



Последовательность процедуры согласования позиций потребителя и изготовителя при разработке нормативного документа на продукцию

Рассмотрим первую стадию процедуры согласования – составление единой таблицы согласования ПФ и требований изготовителя на металлопродукцию. В качестве объекта исследования был выбран болт машиностроительный. В данном исследовании мы рассматривали соответствие характеристик болта требованиям потребителя без учета технологии его изготовления. Кроме того, рассматривая характеристики болта, подразумеваем, что болт используется в болтовом соединении (комплектуется гайкой и шайбой), исходя из того, что потребителя интересует болт не как самостоятельное метизное изделие, а как структурная составляющая болтового соединения, служащего для скрепления нескольких деталей или выполняющего другие функции.

Для того чтобы составить единую таблицу зависимости требований изготовителя и ПФ, необходимо определить основные характеристики болта (табл. 1). Болт характеризуется следующими параметрами: геометрия головки, геометрия стержня, механические свойства, материал основы, материал покрытия, масса, комплектация гайкой и шайбой. Все характеристики, за исключением массы, являются групповыми показателями [9].

В табл. 2 приведены действующие в настоящее время стандарты на болт машиностроительный классов точности А и В по ГОСТ 7805-70 и 7798-70 соответственно [12]. Кроме того, приведены стандарты, на которые имеются ссылки в ГОСТ 7805-70 и 7798-70.

Таблица 1

Характеристики болта и его потребительские функции

Потребительские функции	Характеристики болтов									
	Геометрические характеристики головки болта и особенности конструктивного исполнения	Геометрические характеристики стержня болта и особенности конструктивного исполнения	Механические свойства	Материал основы	Материал покрытия	Масса	Комплектация гайкой и шайбой			
Собираемость	•	•					•			
Устойчивость к разрушению	•	•	•	•	•		•			
Устойчивость к растягивающим/сжимающим деформациям	•	•	•	•			•			
Устойчивость к сдвиговым деформациям	•	•	•	•			•			
Многоразовая затяжка	•	•	•	•			•			
Твердость			•	•						
Коррозионная стойкость				•	•					
Легкосъемность	•	•					•			
Взаимозаменяемость	•	•					•			
Отсутствие самоотвинчивания		•	•				•			
Сопряжение с инструментом	•						•			
Компактность	•	•					•			
Легкость болта	•	•		•	•	•	•			
Эстетический вид	•	•		•	•	•	•			

Примечание. Точками обозначены соответствие характеристик болта его потребительским функциям.

Таблица 2

Параметры болтов и соответствующий нормативный документ

Параметры болтов	Нормативный документ
Номинальный диаметр резьбы, шаг резьбы, диаметр стержня, размер «под ключ», высота головки, диаметр описанной окружности, диаметр отверстия в стержне и головке, расстояние от опорной поверхности до оси отверстия в головке, длина резьбы, длина болта, класс точности, масса болта	ГОСТ 7798-70. Болты с шестигранной головкой класса точности В. Конструкция и размеры ГОСТ 7805-70. Болты с шестигранной головкой класса точности А. Конструкция и размеры
Номинальная площадь поперечного сечения	ГОСТ 1759.0-87. Болты, винты, шпильки и гайки. Технические условия
Механические свойства, материал основного металла	ГОСТ Р 52627-2006. Болты, винты и шпильки. Механические свойства и методы испытаний
Формы и диаметр концов болтов	ГОСТ 12414-94. Концы болтов, винтов и шпилек. Размеры
Размеры радиусов под головкой болтов	ГОСТ 24670-81. Болты, винты и шурупы. Радиусы под головкой
Основные размеры резьбы метрической – средний диаметр, внутренний диаметр, внутренний диаметр по дну впадины	ГОСТ 24705-2004. Основные нормы взаимозаменяемости. Резьба метрическая. Основные размеры
Сбег резьбы, недорез, проточка	ГОСТ 27148-86. Изделия крепежные. Выход резьбы, сбеги, недорезы и проточки. Размеры
Поля допусков внутренней и наружной резьбы, степень точности, отклонения, срез по впадине наружной резьбы, группы и значения длин свинчивания. Допуск наружного и среднего диаметра наружной резьбы, нижнее и верхнее отклонение диаметра наружной резьбы. Степень точности, наименьший радиус кривизны	ГОСТ 16093-2004. Основные нормы взаимозаменяемости. Резьба метрическая. Допуски. Посадки с зазором
Металл болта Покрытие Минимальная толщина покрытия Максимальная толщина покрытия	ГОСТ 9.303-84. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Общие требования к выбору
Шероховатость поверхности	ГОСТ 9378-93. Образцы шероховатости поверхности (сравнения). Общие технические условия
Упаковка, транспортировка и хранение	ГОСТ 18160-72. Изделия крепежные. Упаковка. Маркировка. Транспортирование и хранение
Значение температуры воздуха при эксплуатации, абсолютная и относительная влажность	ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды
Максимальные крутящие затяжки соединений с номинальными диаметрами резьбы от 6 до 24 мм	ОСТ 37.001.050-73. Затяжка резьбовых соединений. Нормы затяжки

Результаты исследования и их обсуждение

В табл. 3 приведены результаты анализа ПФ машиностроительного болта в соответствии с регламентируемыми в стандартах требованиями. Данный анализ позволяет сделать вывод, что одно

и то же свойство болта может обеспечивать выполнение различных ПФ. Это следует учитывать производителю данного вида продукции, т.к. регламентируемые свойства болта могут быть обеспечены как использованием различных исходных материалов, так и различными технологическими

приемами. Так, одним из примеров является разработанная технология производства высокопрочных болтов М16 из углеродистых сталей 20 и 45 после равноканального углового прессования методом холодной высадки. Результаты испытаний показали, что использование ультрамелкозернистых (УМЗ) сталей может существенно повысить

класс прочности болтов, что достаточно сложно обеспечить для данных марок стали традиционными методами обработки. Это объясняется деформационным измельчением структуры материала болтов и формированием в нем УМЗ структуры по всему сечению изделия [13–15].

Таблица 3

Единая таблица согласования потребительских функций машиностроительного болта и требований стандартов

Требования стандартов		Потребительские функции													
		Собираемость	Устойчивость к разрушению	Устойчивость к растягивающим (сжимающим) деформациям	Устойчивость к сдвиговым деформациям	Многократовая затяжка	Твердость	Коррозионностойкость	Легкость	Взаимозаменяемость	Отсутствие самоотвинчивания	Сопряжение с инструментом	Компактность	Легкость	Эстетичность
Геометрические характеристики болтов	Номинальный диаметр резьбы	•	•	•	•	•			•	•	•		•	•	•
	Шаг резьбы	•	•	•	•	•			•	•	•		•	•	•
	Диаметр стержня	•	•	•	•	•			•	•	•		•	•	•
	Размер «под ключ»	•	•	•	•	•			•	•		•	•	•	•
	Высота головки	•	•	•	•	•			•	•		•	•	•	•
	Диаметр описанной окружности	•	•	•	•	•			•	•		•	•	•	•
	Размеры радиуса под головкой болта	•	•	•	•	•			•	•		•	•	•	•
	Диаметр окружности, образованной при сопряжении галтели с опорной плоскостью головки болта	•	•	•	•	•			•	•		•	•	•	•
	Длина резьбы	•	•	•	•	•			•	•	•		•	•	•
	Длина болта	•	•	•	•	•			•	•	•		•	•	•
	Диаметр концов болтов	•	•	•	•	•			•	•	•		•	•	•
	Допуск наружного диаметра наружной резьбы	•	•	•	•	•			•	•	•		•	•	•
	Допуск среднего диаметра наружной резьбы	•	•	•	•	•			•	•	•		•	•	•
	Нижнее отклонение диаметра наружной резьбы	•	•	•	•	•			•	•	•		•	•	•
	Верхнее отклонение диаметра наружной резьбы	•	•	•	•	•			•	•	•		•	•	•
	Наименьший радиус кривизны	•	•	•	•	•			•	•	•		•	•	•
	Длина свинчивания	•	•	•	•	•			•	•	•		•	•	•
	Средний диаметр резьбы	•	•	•	•	•			•	•	•		•	•	•
	Внутренний диаметр резьбы	•	•	•	•	•			•	•	•		•	•	•
	Внутренний диаметр по дну впадины	•	•	•	•	•			•	•	•		•	•	•
Сбег	•	•	•	•	•			•	•	•		•	•	•	
Недорез	•	•	•	•	•			•	•	•		•	•	•	
Проточка	•	•	•	•	•			•	•	•		•	•	•	
Механические и физические свойства	Номинальный предел прочности на растяжение		•	•	•	•	•				•				
	Минимальный предел прочности на растяжение		•	•	•	•	•								
	Твердость по Виккерсу		•	•	•	•	•				•				
	Твердость по Бринеллю		•	•	•	•	•				•				
	Твердость по Роквеллу		•	•	•	•	•				•				
	Напряжение от пробной нагрузки		•	•	•	•	•				•				
	Условный предел текучести		•	•	•	•	•				•				
	Относительное удлинение после разрыва		•	•	•	•	•								
	Относительное сужение площади после разрыва		•	•	•	•	•				•				
	Ударная вязкость		•	•	•	•	•				•				
Минимальная разрушающая нагрузка		•	•	•	•	•				•					
Материал основного металла		•			•	•	•	•						•	•
Минимальная толщина покрытия			•					•	•					•	•
Максимальная толщина покрытия			•					•	•					•	•
Группа условий эксплуатации, хранения			•					•							
Масса болта													•	•	
Шероховатость поверхности болта			•		•			•			•				•
Комплектация гайкой		•	•	•	•	•			•	•	•	•	•	•	•
Комплектация шайбой		•	•	•	•	•			•	•	•	•	•	•	•
Конструктивное исполнение болта		•	•	•	•	•			•	•	•	•	•	•	•
Максимальные крутящие затяжки соединений			•	•	•	•									

Заключение

Существенным двигателем развития конкурентных преимуществ производителей становится возможность последних оперативно и адекватно реагировать на требования потребителя. Причем в последние годы конъюнктура потребительского рынка постоянно изменяется. В связи с этим на первый план выступают вопросы не только обеспечения качества продукции как соответствие требованиям действующих стандартов, но также способность предприятия достаточно быстро реагировать на изменение требований рынка. С другой стороны, потребитель продукции как участник процесса разработки стандартов в свою очередь должен учитывать технико-технологические возможности производителя. Предлагаемый подход позволит сократить время поиска компромиссных решений на первой стадии разработки стандартов – поиска консенсуса между потребителем и производителем.

Работа проведена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства с участием высшего образовательного учреждения (Договор № 02.G25.31.0040), а также государственного задания Минобрнауки России № 11.1525.2014К от 18 июля 2014 г.

Список литературы

1. Федеральный закон от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ «О техническом регулировании» (с изменениями от 9 мая 2006 г., 1 мая, 1 декабря 2007 г., 23 июня 2008 г.).
2. Букин В.П., Ординарцева Н.П. Стандартизация и качество продукции: учебное пособие / под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Г.П. Шлыкова. Пенза: ЦНТИ, 2004. 107 с.
3. Протипология – новый этап развития стандартизации метизного производства / Рубин Г.Ш., Полякова М.А., Чукин М.В., Гун Г.С. // Сталь. 2013. №10. С. 84–87.
4. Рубин Г.Ш., Полякова М.А. Развитие научных основ стандартизации // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 1. С. 97–102.
5. Полякова М.А., Рубин Г.Ш. Современное направление развития стандартизации как науки // Черные металлы. 2014. № 6. С. 32–37.
6. Рубин Г.Ш. Квалиметрия метизного производства: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. 167 с.
7. Рубин Г.Ш. Функциональный анализ как методологическая основа управления качеством метизов // Труды восьмого конгресса прокатчиков. Магнитогорск, 11–15 октября 2010 г. Магнитогорск, 2010. Т. 1. С. 397–399.
8. Рубин Г.Ш., Камалутдинов И.М. Функциональный анализ структуры и свойств геофизического кабеля // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2010. № 1. С. 70–71.
9. Азгальдов Г.Г., Райхман Э.П. О квалиметрии. М.: Стандарты, 1973. 172 с.
10. 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.
11. Актуальные проблемы квалиметрии метизного производства в период зарождения шестого технологического уклада / Г.С. Гун, М.В. Чукин, Г.Ш. Рубин, И.Ю. Мезин, А.Г. Корчунов // Металлург. 2014. № 4. С. 92–95.
12. Проблемы гармонизации стандартов на болты с шестигранной головкой / Полякова М.А., Рубин Г.Ш., Гун Г.С., Каткова В.С. // Сборник докладов международного научно-технического конгресса «ОМД 2014. Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии». (Москва, 14–17 апреля 2014 г.). М., 2014. Ч 1. С. 412–415.
13. Инновационный потенциал новых технологий производства метизных изделий из наноструктурных сталей / Чукин М.В., Копцева Н.В., Барышников М.П., Ефимова Ю.Ю., Носов А.Д., Носков Е.П., Коломиец Б.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2009. № 2. С. 64–68.
14. Исследование структуры и свойств болтов, изготовленных из наноструктурированных углеродистых сталей / Ефимова Ю.Ю., Копцева Н.В., Чукин В.В., Полякова М.А., Барышников М.П. // Обработка сплошных и слоистых материалов: межвуз. сб. науч. тр. / под ред. М.В. Чукина. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2008. С. 144–150.
15. Перспективы производства высокопрочного крепежа из заготовок из углеродистых сталей с ультрамелкозернистой структурой / Чукин М.В., Полякова М.А., Рубин Г.Ш., Копцева Н.В., Гун Г.С. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2014. № 1. С. 39–44.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

REACHING A CONSENSUS BETWEEN CONSUMERS AND MANUFACTURERS IS AN IMPORTANT STAGE WHEN DEVELOPING REGULATORY DOCUMENTS

Danilova Yuliya Vladimirovna – Postgraduate Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Tel.: +7 (3519) 29-84-81. E-mail: j.v.danilova@inbox.ru.

Polyakova Marina Andreyevna – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Tel.: +7 (3519) 29-84-81. E-mail: m.polyakova-64@mail.ru.

Rubin Gennadiy Shmulievich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Tel.: +7 (3519) 29-84-30. E-mail: rubingsh@gmail.com.

Abstract. This paper offers an algorithm of how to bring together views of consumers and manufacturers that has been based on a functionally-oriented analysis and approaches of qualimetry for establishing the relationship of the consumer functions and requirements of regulatory documents for products. As an example, we chose one of the most common types of metalware – a hexagon head bolt. It was established that one feature of such bolts provided various consumer functions. A manufacturer of steel products should consider this fact. The offered approach allowed us to reduce time for searching compromise solutions at the first stage of standards development – reaching a consensus between a consumer and a manufacturer. This algorithm is multipurpose and can be used for all types of products.

Keywords: Standardization, scientific bases, prototyping, standard, consumer functions, manufacturer's requirements, consensus, hexagon head bolt.

References

1. Federal Law #184-FZ "On technical regulation", dated 27 December 2002 (as amended on 9 May 2006, 1 May, 1 December 2007, 23 June 2008).
2. Bukin V.P., Ordinartseva N.P. *Standartizatsiya i kachestvo produktov: uchebnoe posobie* [Standardization and product quality: a tutorial]. Edited by Professor G.P. Shlykov, Doctor of Technical Sciences. Penza: CSTI, 2004, 107 p.
3. Rubin G.Sh., Polyakova M.A., Chukin M.V., Gun G.S. Prototyping: a new stage in the standardization of metal products. *Stal'* [Steel]. 2013, no. 10, pp. 84-87.
4. Rubin G. Sh., Polyakova M.A. Development of the scientific bases of standardization. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2014, no. 1, pp. 97-102.
5. Polyakova M.A., Rubin G.Sh. The modern trend in development of standardization as science. *Chernye metally* [Ferrous metals], 2014, no. 6, pp. 32-37.
6. Rubin G.Sh. *Kvalimetriya metiznogo proizvodstva: monografiya* [Qualimetry of the metalware production: Monograph]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2012, 167 p.
7. Rubin G.Sh. A functionally-oriented analysis as a methodological basis of metalware quality management. *Trudy vos'mogo kongressa prokatchikov* [Proceedings of the Eighth Congress of Rolling Engineers]. Magnitogorsk, 2010, vol. 1, pp. 397-399.
8. Rubin G.Sh., Kamalutdinov I.M. A functionally-oriented analysis of the geophysical cable structure and properties. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2010, no. 1, pp. 70-71.
9. Azgaldov G.G., Reichman E.P. *O kvalimetrii* [About qualimetry]. Moscow: Standards, 1973, 172 p.
10. Rubin G.Sh., Chukin M.V., Gun G.S., Zakirov D.M., Gun I.G. Development of the metalware qualimetry theory. *Chernye metally* [Ferrous metals]. 2012, July, pp. 15-21.
11. Gun G.S., Chukin M.V., Rubin G.Sh., Mezin I.Yu., Korchunov A.G. Current problems of metalware qualimetry during the origin of the sixth techno-economic paradigm. *Metallurg* [Metallurg]. 2014, no. 4, pp.92-95.
12. Polyakova M.A., Rubin G.Sh., Gun G.S., Katkova V.S. Problems of harmonization of standards for hexagon head bolts. *Sbornik dokladov mezhdunarodnogo nauchno-tehnicheskogo kongressa «OMD 2014. Fundamental'nye problemy. Innovatsionnye materialy i tekhnologii»* [Proceedings of the International Scientific and Technical Congress "OMD 2014. Fundamental problems. Innovative materials and technologies"] (Moscow, 14-17 April 2014). Moscow, 2014, part 1, pp. 412-415.
13. Chukin M.V., Koptseva N.V., Baryshnikov M.P., Efimova Yu.Yu., Nosov A.D., Noskov E.P., Kolomiets B.A. Innovative potential of new technologies for metalware from nanostructured steels. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2009, no. 2, pp. 64-68.
14. Efimova Yu.Yu., Koptseva N.V., Chukin V.V., Polyakova M.A., Baryshnikov M.P. Research on the structure and properties of bolts made of nanostructured carbon steels. *Obrabotka sploshnykh i sloistykh materialov: mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov* [Processing of solid and laminated materials: Interuniversity collection of scientific papers]. Edited by M.V. Chukin. Magnitogorsk, MG TU, 2008, pp. 144-150.
15. Chukin M.V., Polyakova M.A., Rubin G.Sh., Koptseva N.V., Gun G.S. Prospects of the production of high-strength fasteners made of carbon steel blanks with an ultrafine grain structure. Forging and stamping facilities. *Obrabotka materialov davleniem* [Material forming]. 2014, no. 1, pp. 39-44.

Данилова Ю.В., Полякова М.А., Рубин Г.Ш. Поиск консенсуса между потребителем и производителем – важный этап при разработке нормативных документов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №2. С. 79–84.

Danilova Yu.V., Polyakova M.A., Rubin G.Sh. Reaching a consensus between consumers and manufacturers is an important stage when developing regulatory documents. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 2, pp. 79–84.

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

УДК 681.513

ИССЛЕДОВАНИЕ СТЕПЕНИ ИДЕНТИФИЦИРУЕМОСТИ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Неусыпин К.А., Пролетарский А.В., Кузнецов И.А.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрены подходы к решению задачи определения идентифицируемости параметров линейных динамических систем. Исследованы оригинальные критерии вычисления меры идентифицируемости конкретных параметров модели динамического объекта на основе использования скалярного подхода. Эффективность критериев меры идентифицируемости продемонстрирована путем анализа качества идентификации гравитационного ускорения в моделях погрешностей инерциальной навигационной системы летательного аппарата.

Ключевые слова: модель динамического объекта, идентифицируемость, качество идентификации, критерий степени идентифицируемости.

Введение

Решение задач управления динамическими различными объектами предполагает использование математической модели исследуемого процесса. Математические модели, полученные на основе физических или каких-либо других законов, в практических приложениях, как правило, не всегда точно отражают исследуемые процессы. Поэтому для уточнения структуры и параметров математической модели применяются различные алгоритмы идентификации [1–3] и алгоритмы построения моделей. Алгоритмы параметрической идентификации позволяют определить отдельные параметры матрицы модели, которая задана априори. В качестве алгоритмов построения моделей часто используются алгоритмы самоорганизации, нейронные сети и генетические алгоритмы.

В процессе функционирования динамического объекта в меняющихся условиях некоторые параметры моделей могут существенно изменяться, поэтому их необходимо определять с помощью алгоритмов идентификации. Точность определения параметров модели зависит от свойств матрицы модели и точности алгоритма идентификации. Выбор используе-

мого алгоритма идентификации определяется из соображений возможностей реализации в имеющемся вычислителе и особенностей проектируемого объекта. Точностные характеристики наиболее популярных алгоритмов идентификации известны. Исследование конкретных моделей на предмет качества идентификации параметров проводилось опытным путем, и в общем случае применение такого подхода требует проведения серии сложных дорогостоящих экспериментов.

Другим способом решения задачи определения качества идентификации является аналитический подход – разработка критерия меры или степени идентифицируемости. В открытых публикациях информация о численных критериях степени идентифицируемости отсутствует. Исследуем задачу принципиальной возможности идентификации, а затем перейдем к рассмотрению вопроса качества (эффективности) идентификации.

Критерии идентифицируемости. Параметрическая идентифицируемость представляет собой возможность определения параметров математической модели системы по результатам измерения определённых выходных величин в течение некоторого интервала времени. Парамет-

ры, вектор которых в дальнейшем обозначается через $\mathbf{a}$, отличается от координат (вектор $\mathbf{x}$) скоростью изменения. Параметры считаются медленно изменяющимися величинами, а в идеальном случае постоянными ($\dot{\mathbf{a}} = 0$).

В соответствие с этим для задачи параметрической идентифицируемости непрерывного процесса уравнения записываются в виде

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{a}, t); \\ \dot{\mathbf{a}} &= 0; \\ \mathbf{z} &= \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{a}, t).\end{aligned}$$

Функция $\mathbf{u} = \mathbf{u}(t)$ в задаче идентифицируемости считается известной (точно измеряемой). Что касается вектора состояния $\mathbf{x} = \mathbf{x}(t)$, то он может считаться либо неизвестным (подлежащим определению по наблюдению той же векторной величины $\mathbf{z}$), либо непосредственно точно измеряемым. Данное условие относится к случаю, когда должно определяться условие наблюдаемости как $\mathbf{x}$, так и $\mathbf{a}$, что и является условием идентифицируемости.

Известны различные способы определения меры (степени) идентифицируемости или условия определимости.

Способ, предложенный Н.А. Балониным [1], позволяет определить принципиальную возможность осуществления процедуры идентификации.

Модель линейной однородной системы имеет вид

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x},$$

где вектор состояния $\mathbf{x} \in R^n$, $\mathbf{x}_0 = \mathbf{x}(0)$.

Линейная однородная система называется полностью идентифицируемой по вектору состояния, если при заданном векторе, начальных условиях $\mathbf{x}_0$ матрица параметров $\mathbf{A}$ может быть однозначно восстановлена за конечный отрезок времени идентификации по одной временной последовательности $\mathbf{x} = \mathbf{x}(t)$. Иначе, пара $(\mathbf{A}, \mathbf{x}_0)$ полностью идентифицируема или идентифицируема вполне, когда множество пар $(\mathbf{A}_-, \mathbf{x}_0)$, объединенных общностью интегральной кривой $\mathbf{x} = \mathbf{x}(t)$, $\mathbf{x}_0 = \mathbf{x}(0)$, вырождается в точку $\mathbf{A}_- = \mathbf{A}$. В противном случае пара неидентифицируема.

Необходимое и достаточное условие полной идентифицируемости пары $(\mathbf{A}, \mathbf{x}_0)$ состоит в следующем

$$\text{Rank}[\mathbf{W}_0] = \text{Rank}[\mathbf{x}_0, \mathbf{A}\mathbf{x}_0, \mathbf{A}^2\mathbf{x}_0, \dots, \mathbf{A}^{n-1}\mathbf{x}_0] = n.$$

$\mathbf{W}_0$ – матрица идентифицируемости.

Данный метод предполагает определение фундаментальной возможности идентификации параметров динамической системы.

Известен метод, предложенный А.В. Балакришнаном [2], основанный на конкретном критерии идентифицируемости.

Задана линейная модель сигнала:

$$\begin{cases} \mathbf{v}_n = \mathbf{C}\mathbf{x}_n + \mathbf{N}_n; \\ \mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_n + \mathbf{B}\mathbf{U}_n. \end{cases} \quad (1)$$

$\mathbf{B}$ – неизвестная матрица $p \times r$, $\mathbf{A}$ и $\mathbf{C}$ – известные матрицы $n \times n$ и $m \times n$, $\mathbf{U}_m$ – входная последовательность $p \times 1$, Известна и наблюдаема дисперсия белого шума.

Пусть

$$\begin{cases} \mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_0 \\ \mathbf{B} \end{bmatrix}; \\ \mathbf{L}_n \mathbf{Z} = \mathbf{C}\mathbf{A}^n \mathbf{x}_0 + \mathbf{C}\mathbf{K}_n \mathbf{B}. \end{cases}$$

Следовательно, $\mathbf{v}_n = \mathbf{L}_n \mathbf{Z} + \mathbf{N}_n$.

Оценка безусловного максимума правдоподобия (ОБМП) задается выражением

$$\hat{\mathbf{Z}}_n = E[\mathbf{Z} | \mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_n] = (\mathbf{\Lambda}_n^{-1} + \mathbf{\mathfrak{R}}_n)^{-1} \sum_{k=1}^n \mathbf{L}_k^* \mathbf{v}_k. \quad (3)$$

$$\mathbf{\mathfrak{R}}_n = \sum_{k=1}^n \mathbf{L}_k^* \mathbf{L}_k = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^n \mathbf{A}^{*k} \mathbf{C}^* \mathbf{C} \mathbf{A}^k & \sum_{k=1}^n \mathbf{A}^{*j} \mathbf{C}^* \mathbf{C} \mathbf{K}_j \\ \sum_{j=1}^n \mathbf{K}_j^* \mathbf{C}^* \mathbf{C} \mathbf{A}^j & \sum_{j=1}^n \mathbf{K}_j^* \mathbf{C}^* \mathbf{C} \mathbf{K}_j \end{bmatrix}.$$

ОБМП является асимптотически эффективной оценкой. Качество таких оценок асимптотически не зависит от начальных дисперсий.

Для оценки (3) нужно использовать все имеющиеся данные и, кроме того, дополнительная трудность состоит в необходимости оценивания начального состояния. Теперь построим оценку, которая является последовательной, или «текущей», и которая не использует какую-либо оценку состояния. Для этой цели необходимо предположить, что выполнено следующее «условие определимости».

Условие определимости (критерий идентифицируемости) заключается в том, что предел

$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N K_n^* C_n^* C K_n$ существует и невырожден.

Условие определимости также накладывает ограничение на входную последовательность, то есть при выполнении условия определимости (и устойчивости матрицы A) ковариационная матрица погрешности $E[(B - \hat{B}_n)(B - \hat{B}_n)^*] \rightarrow 0$ при $n \rightarrow \infty$.

Вычисление идентифицируемости по данной методике предполагает сложные математические вычисления, поэтому практическое применение его затруднительно.

Другой известный способ предполагает использование критерия идентифицируемости, предложенного С.А. Айвазяном [3].

Рассмотрим некоторые наиболее важные типы ограничений. Предполагается, что априорные ограничения являются линейными однородными функциями, коэффициенты матрицы A могут быть однозначно восстановлены по матрице приведенной формы Π .

Пусть I_k – единичная матрица порядка $K \times K$.

Введем обозначение $W = \begin{bmatrix} \Pi \\ I_k \end{bmatrix}$.

Соотношение $W\Pi + \Gamma = 0$ между структурной и приведенной формой теперь может быть записано в виде $AW = 0$.

A – матрица порядка $G \times (G+K)$; W – матрица порядка $(G+K) \times K$. Имеющая ранг K .

Пусть $\alpha_1 \Phi = 0$, где Φ – матрица из $G+K$ строк, имеющая столько столбцов, сколько ограничений. Например, пусть априори известно, что коэффициент $\beta_{12} = 0$. Тогда один из столбцов матрицы Φ имеет вид $(0, 1, 0, \dots, 0)^T$. Тогда элементы вектора α_1 являются решением системы уравнений $\alpha_1 [W\Phi] = 0$.

В силу правила нормализации ($\beta_{11} = 0$) для идентифицируемости первого уравнения необходимо и достаточно, чтобы пространство решений системы было одномерным, т.е.

$$\text{rank}[W\Phi] = G + K - 1. \quad (4)$$

Пусть L – число ограничений. Тогда $[W\Phi]$ содержит $K+L$ столбцов и для выполнения (4) необходимо, чтобы $L \geq G-1$, то есть для идентифицируемости какого-либо из уравнений необходимо, чтобы число ограничений было не меньше числа уравнений модели, уменьшенного на единицу.

Если имеются только исключаяющие ограни-

чения, т.е. априорная информация о равенстве нулю некоторых коэффициентов, то необходимое условие идентифицируемости определенного уравнения таково: число неизвестных, исключенных из уравнения, должно быть по меньшей мере равно числу уравнений минус единица. Последнее может сформулировано следующим образом: число исключенных из уравнения экзогенных переменных должно быть не меньше числа участвующих в нем эндогенных переменных, уменьшенного на единицу.

Сформулированные необходимые условия (так называемые правила порядка) в силу своей простоты являются весьма полезными при решении проблемы идентифицируемости, поскольку при построении модели они позволяют сразу выявить неидентифицируемые уравнения. Однако эти условия могут оказаться далекими от достаточных. Необходимое и достаточное условие (4) не годится для проверки идентифицируемости модели, поскольку требует построения матрицы Π . Тем не менее из него можно извлечь критерий идентифицируемости и в терминах структурной формы (правило ранга).

Первое уравнение системы идентифицируемо тогда и только тогда, когда $\text{rank}(A\Phi) = G-1$. Это утверждение может быть выведено непосредственно из (5), но его можно получить из соображений, связанных с инвариантностью коэффициентов при умножении структурной формы на допустимые матрицы.

Вышеупомянутый метод идентификации подходит, скорее, для теоретических абстрактных задач.

Способ вычисления степени идентифицируемости параметров на основе скалярного подхода [4]. Рассмотрим математическую модель исследуемого динамического объекта, которая имеет следующий вид:

$$x_k = \Phi x_{k-1} + w_{k-1}, \quad (5)$$

где x_{k-1} – вектор состояния; w_{k-1} – вектор входного шума; Φ – матрица модели.

Часть вектора состояния измеряется:

$$z_k = H x_k + v_k, \quad (6)$$

где z_k – вектор измерений; H – матрица измерений; v_k – вектор измерительного шума.

Для определения неизвестных параметров целесообразно использовать алгоритмы оцени-

вания [4,5], например фильтр Калмана или его прямые адаптивные модификации.

Судить о мере идентифицируемости можно по двум характеристикам: точности идентификации и времени сходимости. Критерий, по которому определяется степень идентифицируемости, имеет вид [5]

$$\gamma^i = \frac{P_0^i r}{P_0 r^{*i}}, \quad (7)$$

где P_0 – дисперсия начального значения непосредственно измеряемой компоненты вектора идентифицируемых параметров a .

В случае, когда не удастся точно определить начальное значение дисперсии ошибки оценивания, можно воспользоваться критерием степени идентифицируемости вида

$$\gamma^i = \frac{M[(a^i)^2] r}{M[(z^i)^2] r^{*i}}. \quad (8)$$

Здесь $M[(a^i)^2]$ – дисперсия произвольной i -й компоненты вектора параметров a ; $M[(z^i)^2]$ – дисперсия непосредственно измеряемой компоненты вектора параметров; $r = M[v^2]$ – дисперсия исходного измерительного шума;

$$r_k^{*i} = \frac{1}{2} \sqrt{\{p_0^i k - M[(v_k^i)^2]\}^2 + 4M[(v_k^i)^2] p_0^i (k-1)} - \frac{1}{2} \{p_0^i k - M[(v_k^i)^2]\}$$

– дисперсия приведенного измерительного шума.

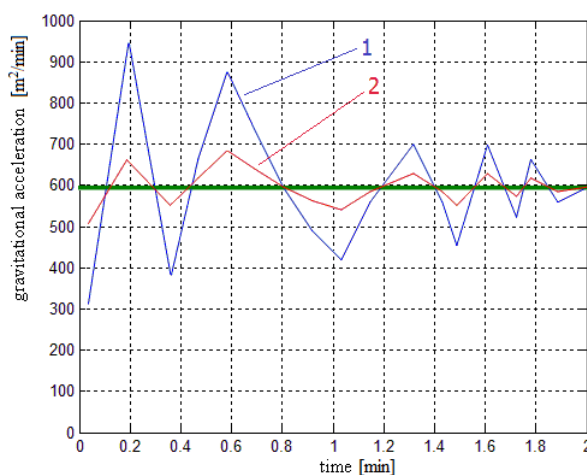
В критериях степени идентифицируемости (7) и (8) мерой качества идентификации является скаляр. Эта особенность позволяет проводить сравнение степеней идентифицируемости компонент векторов параметров матриц различных объектов.

Таким образом, формализованные зависимости (7), (8) используются для определения степени идентифицируемости параметров матрицы Φ . Дисперсия исходного измерительного шума определяется из практических соображений в соответствии с режимом работы измерительной системы или принимается значение из паспорта измерительного прибора. Определенные сложности возникают при вычислении приведенного измерительного шума. Однако при использовании матрицы модели исследуемой системы скалярного адаптивного алгоритма оценивания при идентификации параметров дисперсия приведенного измерительного шума вычисляется на каждом шаге функционирования алгоритма.

С помощью численных критериев можно определить качество идентификации конкретных параметров матрицы модели динамического объекта. О качестве идентификации или эффективности идентификации можно судить по двум характеристикам: точности и времени идентификации. Имеется ввиду максимально достижимая точность идентификации и необходимое время до достижения заданной точности идентификации.

Рассмотрим в качестве примера известные модели погрешностей инерциальной навигационной системы (ИНС) [4]. Определим степень идентифицируемости параметра матрицы, содержащего g – гравитационное ускорение. В процессе полета g меняется при изменении высоты полета. Поэтому априорное значение $9,8 \text{ м/с}^2$ требуется уточнять при изменении высоты полета ЛА.

Сначала рассмотрим модель одного горизонтального информационного канала ИНС [4]. Степень идентифицируемости g достигает значения 0,001. Затем исследуем модель, составленную для трех каналов ИНС. Эта модель включает перекрестные связи между информационными каналами [4]. В этом случае степень идентифицируемости исследуемого параметра увеличивается и составляет 0,003. В соответствии с критерием (8) эффективность идентификации g будет выше в случае использования более подробной модели. Этот результат подтверждается результатами математического моделирования.



Результаты математического моделирования скалярного алгоритма идентификации.

На рисунке введены следующие обозначения: 1 – оценка параметра g с помощью ска-

лярного алгоритма идентификации с использованием модели одного канала ИНС, 2 – оценка параметра g при использовании модели трех каналов ИНС.

Как видно из графиков, точность идентификации при использовании модели погрешностей для трех каналов ИНС на 12% выше, чем точность идентификации при использовании модели погрешностей одного канала ИНС.

Заключение

Исследованные численные критерии степени идентифицируемости конкретных параметров матрицы модели динамического объекта имеют ясный физический смысл, отличаются простотой, универсальностью, позволяют вычислять

качество идентификации параметров в виде скаляра и удобны при использовании в практических приложениях.

Список литературы

1. Балонин Н.А. Теоремы идентифицируемости. СПб.: Изд-во «Политехника», 2010. 48 с.
2. Балакришнан А.В. Теория фильтрации Калмана: пер.с англ. М.: Мир, 1988. 168 с.
3. Айвазян С. А., Енюков И. С., Мешалкин Л. Д. Прикладная статистика: Исследование зависимостей / под ред. С. А. Айвазяна. М.: Финансы и статистика, 1985. 487 с.
4. Сальчев О.С. Скалярное оценивание многомерных динамических систем. М.: Машиностроение, 1987. 216 с.
5. Неусыпин К.А., Пролетарский А.В., Кузнецов И.А. Синтез численного критерия меры идентифицируемости параметров моделей // Автоматизация. Современные технологии. 2015. №3. С. 9–13.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

RESEARCH ON AN IDENTIFIABILITY DEGREE OF DYNAMIC SYSTEM PARAMETERS

Neusypin Konstantin Avenirovich – D.Sc. (Eng.), Professor, Bauman Moscow State Technical University. Moscow, Russia. E-mail: neusypin@mail.ru.

Proletarsky Andrey Viktorovich – D.Sc. (Eng.), Professor, Bauman Moscow State Technical University. Moscow, Russia.

Kuznetsov Igor Aleksandrovich – Postgraduate Student, Bauman Moscow State Technical University. Moscow, Russia.

Abstract. This article analyzes approaches to a problem of determining the identifiability degree of linear dynamic system parameters. The authors studied original criteria for calculation of the identifiability degree of specific parameters of a dynamic object model applying a scalar approach. Efficiency of criteria for the identifiability degree was demonstrated by analyzing the quality of identification of the gravitational acceleration in error models of an aircraft inertial navigation system.

Keywords: Dynamic object model, identifiability, quality of identification, criterion of the identifiability degree.

References

1. Balonin N.A. *Teoremy identifikatsionnosti* [Theorems of identifiability]. Saint Petersburg: Politekhnik, 2010, 48 p.
2. Balakrishnan A.V. *Teoriya fil'tratsii Kalmana* [Kalman filtering theory]. Transl. from Eng. Moscow: Mir, 1988, 168 p.
3. Ayvazyan S.A., Enyukov I.S., Meshalkin L.D. *Prikladnaya statistika: Issledovanie zavisimosti. pod red. S. A. Ayvaziana* [Applied Statistics: Research of dependency: Reference book. Edited by S.A. Ayvazyan]. Moscow: Finance and Statistics, 1985, 487 p.
4. Salychev O.S. *Skalyarnoe otsenivanie mnogomernykh dinamicheskikh sistem* [The scalar evaluation of multidimensional dynamical systems]. Moscow: Mechanical Engineering, 1987, 216 p.
5. Neusypin K.A., Proletarsky A.V., Kuznetsov I.A. The synthesis of a numerical criterion of the identifiability degree of model parameters. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii* [Automation. Modern technologies]. 2015, no. 3, pp. 9-13.

Неусыпин К.А., Пролетарский А.В., Кузнецов И.А. Исследование степени идентифицируемости параметров динамических систем // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №2. С. 85–89.

Neusypin K.A., Proletarsky A.V., Kuznetsov I.A. Research on an identifiability degree of dynamic system parameters. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 2, pp. 85–89.

ЭНЕРГЕТИКА МЕТАЛЛУРГИИ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ

УДК 621.365.22+681.515.4

АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТОВ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ ЭЛЕКТРОДОВ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ И УСТАНОВОК КОВШ-ПЕЧЬ

Николаев А.А., Корнилов Г.П., Тулупов П.Г., Повелица Е.В.

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

Аннотация. В статье рассмотрены различные варианты построения систем автоматического управления перемещением электродов дуговых сталеплавильных печей и установок ковш-печь. Для каждой системы проведена оценка показателей качества регулирования, выделены преимущества и недостатки, определены условия эксплуатации на действующем производстве.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, установка ковш-печь, система автоматического управления перемещением электродов, адаптивный регулятор импеданса, гидропривод перемещения электродов.

Введение

В настоящее время происходит постепенное замещение кислородно-конвертерного и мартеновского производств электросталеплавильным. Данный факт обуславливает появление на рынке различных производителей металлургического оборудования дуговых сталеплавильных печей (ДСП) и установок ковш-печь (УКП). Как правило, каждый производитель в комплекте с основным оборудованием поставляет систему автоматического управления перемещением электродов. При этом алгоритмы регулирования для каждой системы могут быть различны.

Наиболее широкую известность на российских металлургических предприятиях получили системы управления положением электродов ARCOS и HIREG, которые используются в электросталеплавильном цехе (ЭСПЦ) ОАО «ММК» (г. Магнитогорск, Россия) и ЭСПЦ ЗАО «ММК Metalurji» (г. Искендерун, Турция). В качестве их альтернативы можно выделить SIMETAL Simelt, MeltNet Ferrotron и E.M.P.E.R.E. Основные сведения о производителях и параметрах регулирования для данных систем приведены в **табл. 1**.

Также в некоторых старых аналоговых системах управления в качестве параметра регулирования использовался дифференциальный параметр $D = U_{2\phi} - aI_{ARC}$ [1], где $U_{2\phi}$ – фазное напряжение, I_{ARC} – ток дуги, a – коэффициент пропорциональности. Данный способ в настоящее время устарел и практически не применяется.

Таблица 1
Основные сведения о системах управления перемещением электродов ДСП и УКП, используемых на отечественных металлургических предприятиях

Система управления	Производитель	Параметр регулирования
HIREG	Danieli Automation, Италия	Адмитанс вторичного контура ДСП (УКП) $Y_{2\phi}$
ARCOS, ArCOS Light	Siemens VAI, Германия	Импеданс вторичного контура ДСП (УКП) $Z_{2\phi}$, на поздних стадиях плавки – активное сопротивление электрической дуги R_{ARC} ; в некоторых случаях – напряжение дуги U_{ARC}
SIMETAL Simelt		
DECTEQ™ MeltNet	Ferrotron, Германия	Импеданс вторичного контура ДСП (УКП) $Z_{2\phi}$
E.M.P.E.R.E	Amec Spie, Франция	Импеданс вторичного контура ДСП (УКП) $Z_{2\phi}$

Выбор алгоритма регулирования, адаптированного под конкретные производственные условия, является актуальной задачей, которая требует проведения комплексного анализа с целью выделения преимуществ и недостатков различных систем. В данной статье рассмотрены системы регулирования напряжения дуги U_{ARC} , сопротивления дуги R_{ARC} , тока дуги I_{ARC} , импеданса фазы $Z_{2ф}$ и адмитанса фазы $Y_{2ф}$ применительно к ДСП-250 ЗАО «ММК Metalurji».

1. Описание математической модели электрического контура ДСП-250 с гидроприводом перемещения электродов

В качестве объекта исследования выбрана самая мощная в мире дуговая сталеплавильная печь ДСП-250, функционирующая в ЭСПЦ ЗАО «ММК Metalurji» в г. Искендерун (Турция). Схема замещения электрического контура приведена на рис. 1.

Схема замещения электрического контура включает в себя: 1) активное сопротивление и индуктивность питающей сети 34,5 кВ R_S и L_S , сопротивление и индуктивность короткой сети R_{KC} и L_{KC} , а также приведённые к вторичной обмотке сопротивления и индуктивности печного трансформатора и реактора R_p , R_{mp} , L_p , L_{mp} . Электрическая дуга представляется нелинейным дифференциальным уравнением мгновенной проводимости – уравнением Касси [2]. Для повышения точности расчетов в схеме замещения также может быть учтена взаимная индукция между фазами короткой сети M .

В процессе исследования использованы фактические параметры электрического контура ДСП-250, соответствующие 10-й ступени печного трансформатора и 6 ступени реактора:

$$R'_{Tp} = 0,029 \text{ мОм}, L'_{Tp} = 0,00395 \text{ мГн},$$

$$R'_p = 0,00215 \text{ мОм}, L'_p = 0,00108 \text{ мГн},$$

$$R_{KC} = 0,27 \text{ мОм}, L_{KC} = 0,0135 \text{ мГн},$$

$$R'_S = 0,1 \text{ мОм}, L'_S = 0,0032 \text{ мГн}.$$

Состав структурной схемы трёхфазного электрического контура на примере сверхмощной ДСП подробно описан в [2]. Общий подход к построению структурной схемы и подробное исследование системы гидропривода перемещения электродов (рис. 2) ДСП-250 приведены в [3–5].

Структурная схема электрического контура (рис. 3) одной фазы основывается на дифференциальном уравнении Касси

$$\Theta_{ARC} \frac{dg_{ARC}(t)}{dt} = \left(\frac{U_{ARC}^2(t)}{E_{ARC}^2} - 1 \right) g_{ARC}(t), \quad (1)$$

где Θ_{ARC} – тепловая постоянная времени дуги, которая изменяется в течение плавки в пределах 0,2–5 мс; $g_{ARC}(t)$ – проводимость дуги; $U_{ARC}(t)$ – напряжение дуги; $E_{ARC} = \alpha + \beta L_{ARC}$ – противоЭДС дуги, где $\alpha = 40$ В – падение напряжения на анодно-катодной области электрода, $\beta = 1$ В/мм – градиент напряжения столба дуги, L_{ARC} – длина дуги.

Также в модели электрической дуги учитывается начальная проводимость g_{ARC0} .

На основе ранее проведённых исследований была разработана общая структурная схема, включающая в себя как систему гидропривода перемещения электродов (с учётом нелинейных свойств сервоклапана), так и трёхфазный электрический контур ДСП-250 (рис. 4).

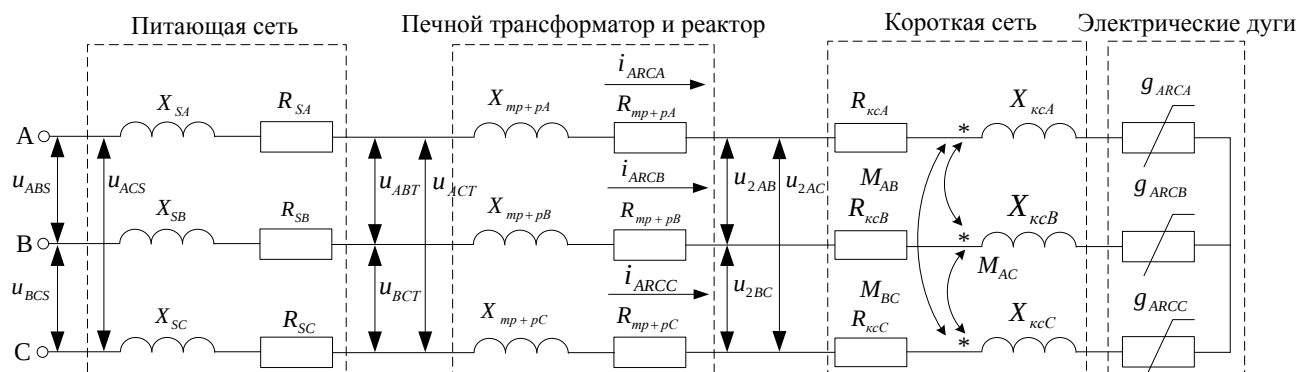


Рис. 1. Схема замещения трёхфазного электрического контура ДСП-250

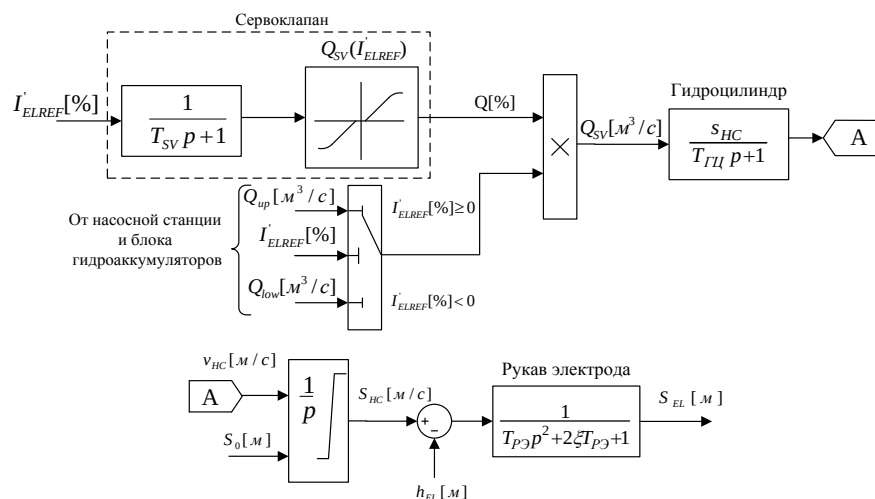


Рис. 2. Структурная схема гидропривода перемещения электрода одной фазы ДСП-250

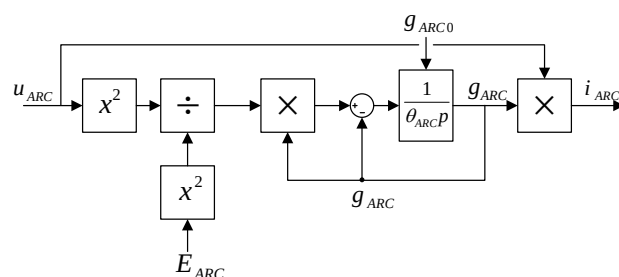


Рис. 3. Структурная схема одной фазы ДСП на основе уравнения Касси

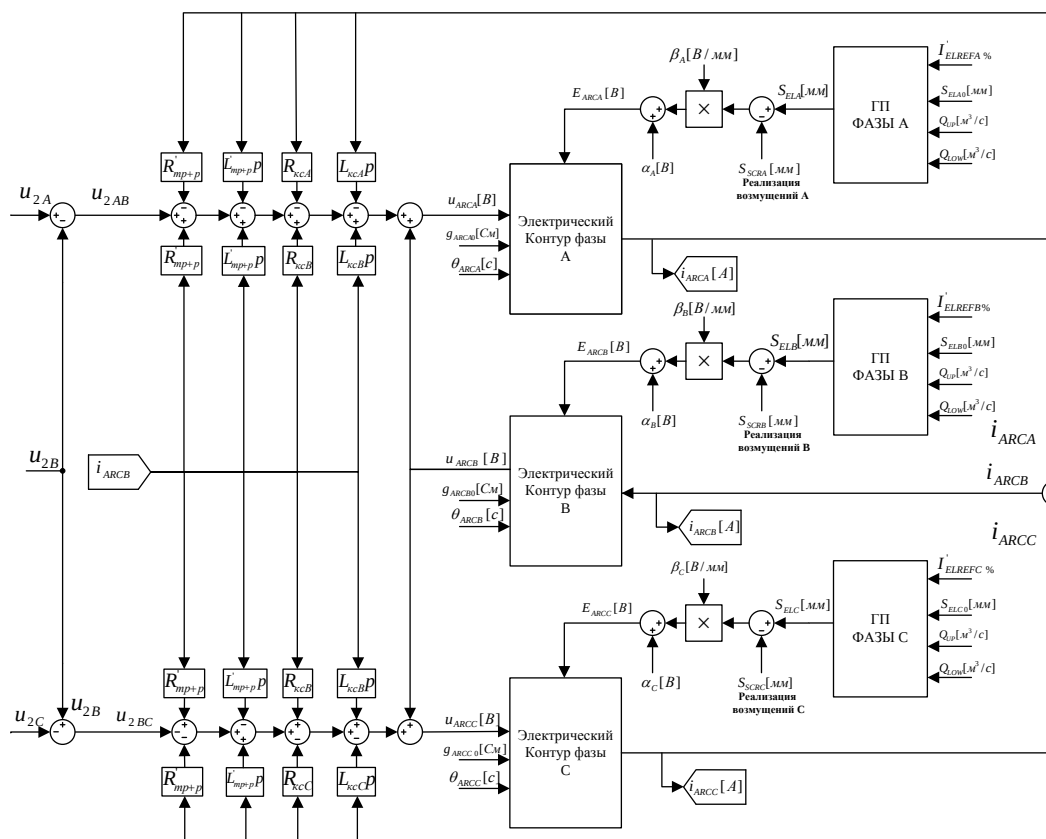


Рис. 4. Структурная схема электрического контура ДСП-250 с гидроприводом перемещения электродов

На основании данных регистрограмм токов и мощности дуги, приведённых в статье [6], можно судить о том, что разработанная структурная схема позволяет проводить качественную оценку процессов, происходящих в реальном объекте.

Данная структурная схема позволяет произвести математическое моделирование с целью получения статических характеристик объекта регулирования по каждому из пяти параметров: напряжение дуги U_{ARC} , сопротивление дуги R_{ARC} , ток дуги I_{ARC} , импеданс фазы $Z_{2\phi}$ и адмитанс фазы $Y_{2\phi}$. На основании этих характеристик можно получить параметры регуляторов.

2. Статические характеристики объекта регулирования при использовании различных типов обратных связей

Такие параметры, как адмитанс $Y_{2\phi}$, импеданс $Z_{2\phi}$, напряжение U_{ARC} и активное сопротивление дуги R_{ARC} невозможно измерить напрямую. В системе управления они могут быть вычислены косвенно, на основе прямых измерений фазных напряжений на вторичной обмотке печного трансформатора U_{2a} , U_{2b} , U_{2c} и токов дуги i_{ARCA} , i_{ARCB} , i_{ARCC} (измеряются с помощью поясов Роговского).

Запишем выражение для активной мощности фазы:

$$P_2 = \frac{1}{T} \int_0^T u_{2\phi} i_{ARC} dt. \quad (2)$$

Мощность фазы включает в себя активные потери и мощность дуги:

$$P_2 = P_{ARC} + \Delta P_2 = I_{ARC}^2 R_{ARC} + I_{ARC}^2 R_{KC}. \quad (3)$$

Из выражения (3) выразим сопротивление дуги:

$$R_{ARC} = \frac{P_2 - I_{ARC}^2 R_{KC}}{I_{ARC}^2}. \quad (4)$$

Используя формулу (4), определим выражение для напряжения дуги:

$$U_{ARC} = I_{ARC} R_{ARC} = \frac{P_2 - I_{ARC}^2 R_{KC}}{I_{ARC}}. \quad (5)$$

Также приведём формулу для импеданса и адмитанса:

$$Z_{2\phi} = \frac{U_{2\phi}}{I_{ARC}} = \frac{1}{Y_{2\phi}}. \quad (6)$$

Отметим, что формулы (4) и (5) позволяют вычислить напряжение и сопротивление дуги с допустимой погрешностью при условии, что ток дуги и фазное напряжение близки к синусоидальным. Поэтому регулирование данных параметров возможно только на поздних стадиях плавки, когда тепловая постоянная времени дуги достаточно велика, а коэффициент искажения синусоидальности кривой тока дуги K_I (или в зарубежном обозначении – THD) относительно низкий:

$$K_I = \frac{\sqrt{I_{(0)}^2 + I_{BG}^2}}{I_{ARC(1)}}, \quad (7)$$

где $I_{(0)}$ – постоянная составляющая тока дуги; I_{BG} – действующее значение высших гармоник тока дуги; $I_{ARC(1)}$ – действующее значение 1-й гармоники тока дуги.

На **рис. 5** представлен график изменения K_I в течение плавки для ДСП-180.

В статье [4] описан усовершенствованный адаптивный регулятор импеданса ДСП и АПК, структурная схема которого представлена на **рис. 6**.

Общая структура регулятора сохраняется вне зависимости от параметра регулирования. Изменениям подвергаются только линеаризующие характеристики, предназначенные для компенсации коэффициента усиления объекта, который определяется как первая производная от статической характеристики по длине дуги.

В процессе математического моделирования были получены статические характеристики для напряжения дуги, активного сопротивления дуги, тока дуги, импеданса и адмитанса фазы и характеристики коэффициента усиления объекта в каждом случае (**рис. 7**). Для удобства сравнения основные параметры данных характеристик сведены в **табл. 2**. На основании полученных статических характеристик были разработаны системы регулирования U_{ARC} , R_{ARC} , I_{ARC} , $Z_{2\phi}$, $Y_{2\phi}$. Для каждой из них получены графики переходных процессов, отражающие реакцию системы на управляющее воздействие и возмущающее воздействие в виде случайного изменения длины дуги $\Delta L_{ARCB03M} = +100\text{мм}$ в фазе «А» (**рис. 8**).

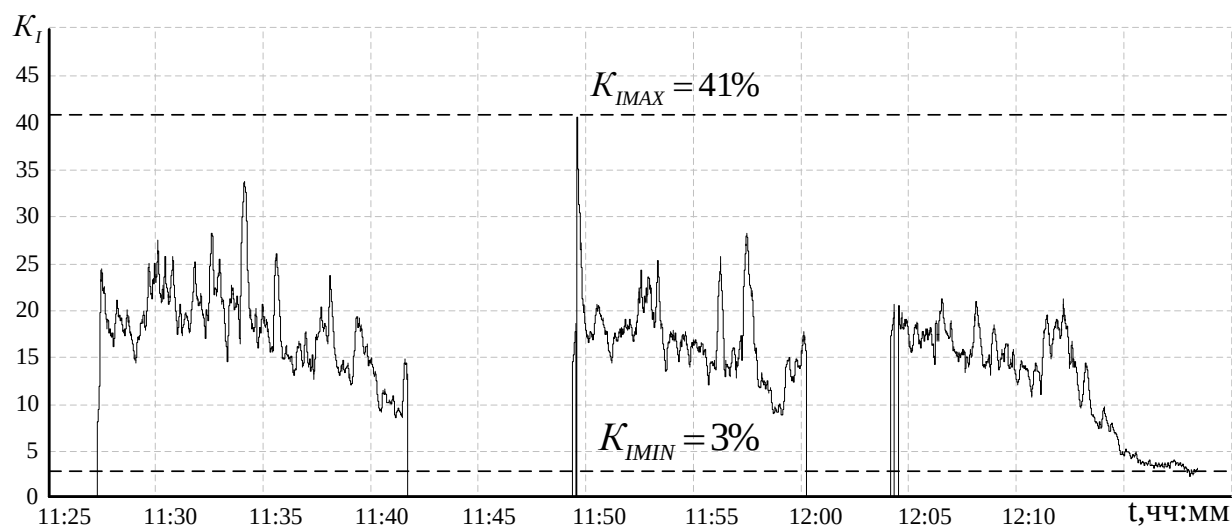


Рис. 5. График изменения K_I на различных стадиях плавки

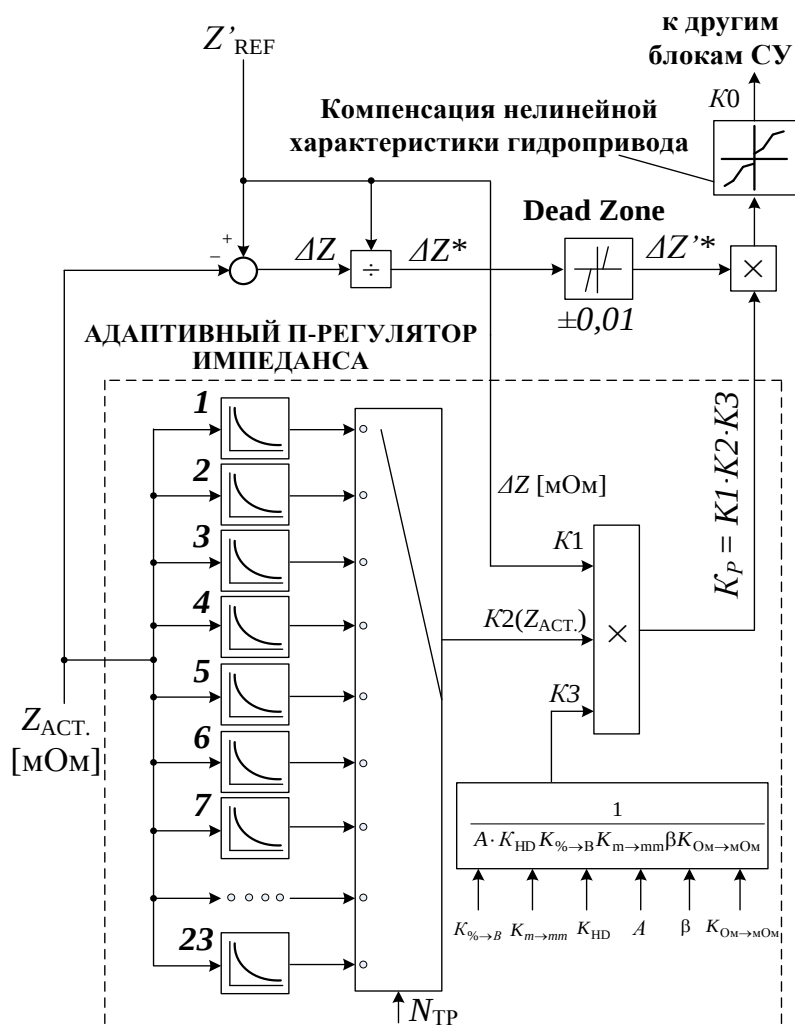


Рис. 6. Структура адаптивного регулятора импеданса АПК-1 ЭСПЦ ОАО ММК, реализованного в системе управления «РАДУГА ПК»

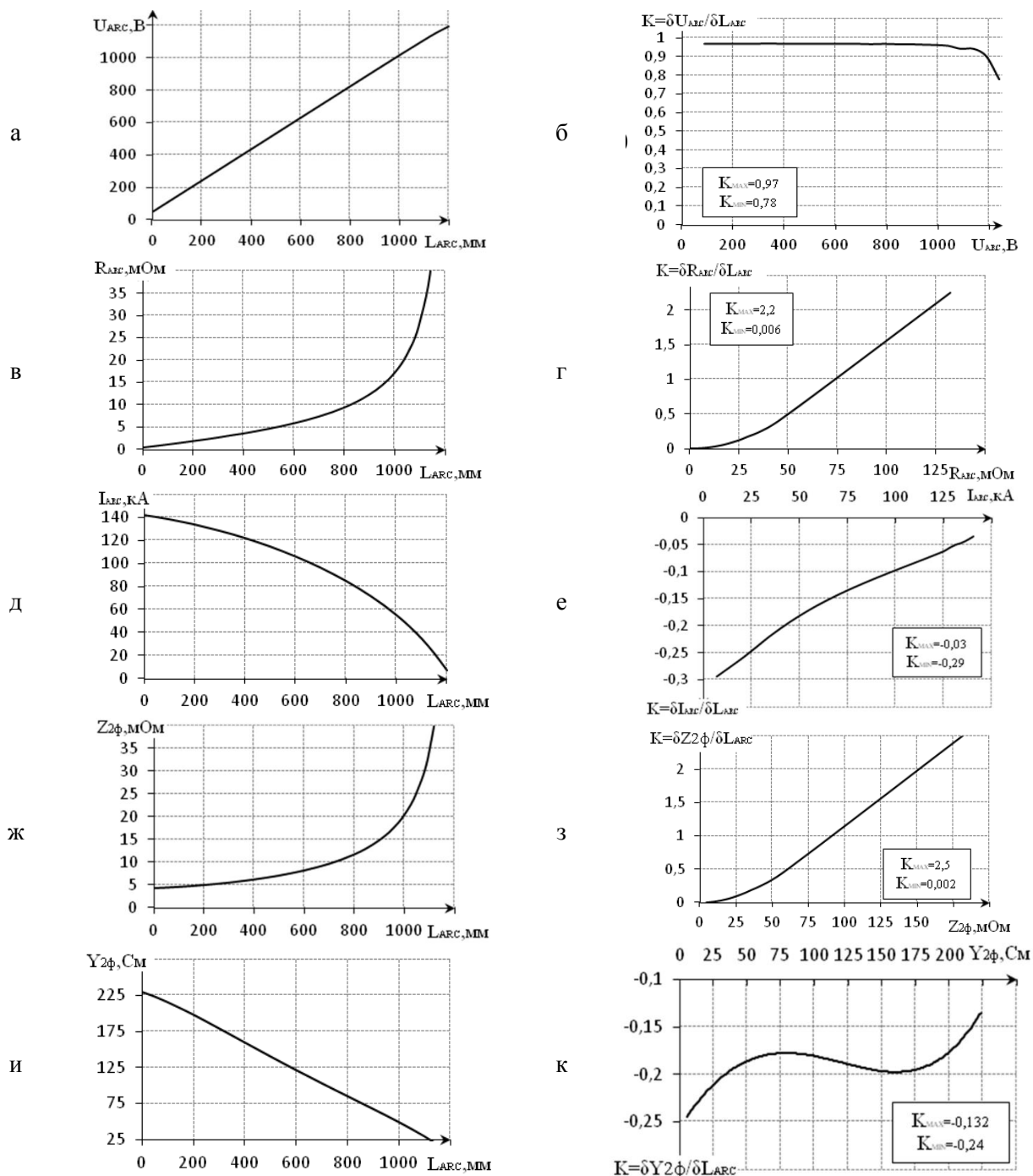


Рис. 7. Статические характеристики и характеристики коэффициента усиления объекта регулирования для различных параметров регулирования: U_{ARC} – а и б; R_{ARC} – в и г; I_{ARC} – д и е; $Z_{2\phi}$ – ж и з; $Y_{2\phi}$ – и и к

Таблица 2

Основные параметры статических характеристик объекта регулирования

Наименование параметра	Регулируемая координата				
	U_{ARC}	R_{ARC}	I_{ARC}	$Z_{2\phi}$	$Y_{2\phi}$
Тепловая постоянная времени дуги Θ_{ARC}	3,5 мс	3,5 мс	3,5 мс	1,5 мс	1,5 мс
Значение параметра при критической L_{ARC}	1240 В	134 мОм	6,8 кА	4,3 мОм	5,4 См
Значение параметра при КЗ	40 В	0,34 мОм	143 кА	183 мОм	230 См
Максимальный коэффициент усиления ОР	0,97 В/мм	2,2 мОм/мм	-0,03 кА/мм	2,5 мОм/мм	-0,132 См/мм
Минимальный коэффициент усиления ОР	0,78 В/мм	0,006 мОм/мм	-0,29 кА/мм	0,002 мОм/мм	-0,243 См/мм

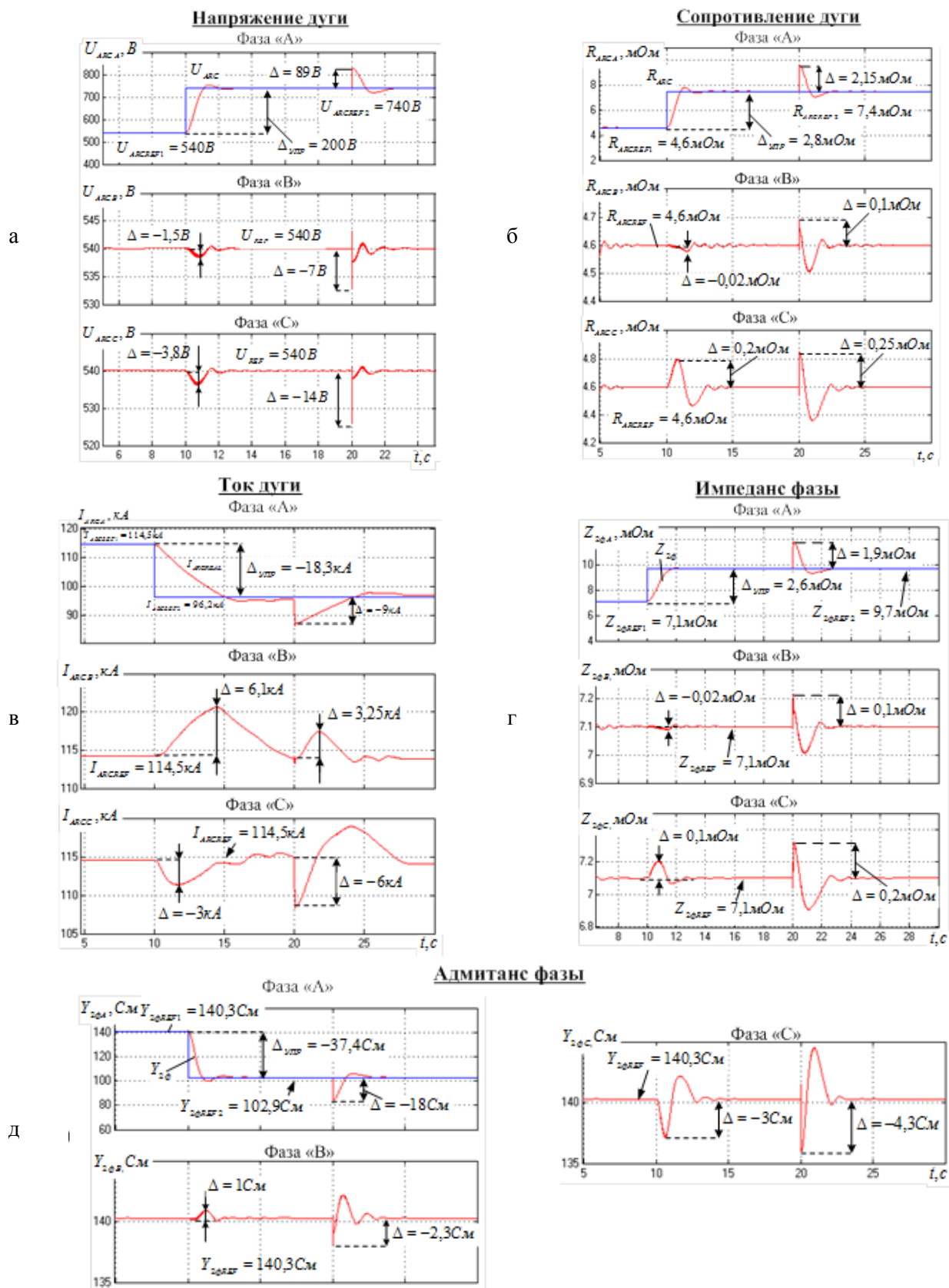


Рис. 8. Реакция систем регулирования U_{ARC} , R_{ARC} , I_{ARC} , Z_{ϕ} , Y_{ϕ} на возмущающее и управляющее воздействие

В табл. 2 приведены основные показатели качества регулирования для каждой системы. Оценка влияния одной фазы на другую производится на основании двух коэффициентов взаимного влияния фаз:

$$K_{ВЗУПР} = \frac{\Delta L_{\text{ARCУСТ В,С}}}{\Delta L_{\text{ARCУСТ А}}}; \quad (9)$$

$$K_{ВЗВОЗМ} = \frac{\Delta L_{\text{ARCMAX В,С}}}{\Delta L_{\text{ARCMAX А}}},$$

где $K_{ВЗУПР}$ – коэффициент, характеризующий влияние изменения установившегося значения длины дуги фазы «А» на изменение установившегося значения длин дуг фаз «В» и «С»; $K_{ВЗВОЗМ}$ – коэффициент, отражающий степень влияния мгновенного изменения длины дуги фазы «А» на максимальную величину отклонения длины дуги фаз «В» и «С» от установившегося значения.

Помимо этого, производилась оценка времени нарастания $t_{\text{нар}}$, времени достижения 2% зоны от координаты задания $t_{\text{рег}}$, а также максимальное отклонение от установившегося значения как по управляющему, так и по возмущающему воздействию Δ . Результаты приведены в табл. 3.

Исходя из данных, приведённых в табл. 3, можно сделать вывод, что наилучшими показателями качества обладает система регулирования напряжения дуги. Необходимо отметить, что на практике данный способ используется редко. Переход к регулированию напряжения и активного сопротивления дуги обусловлен необходимостью поддержания постоянной длины дуги (чего труднее добиться в случае регулирования адмитанса и импеданса). Как активное сопротивление, так и напряжение дуги возможно вычислить достаточно точно только на поздних стадиях плавки, когда коэффициент искажения тока K_I мал, а тепловая постоянная времени дуги Θ_{ARC} достаточно велика. Однако практически на всем диапазоне длин дуг коэффициент усиления характеристики $R_{\text{ARC}}=f(L_{\text{ARC}})$ значительно меньше, чем у характеристики $U_{\text{ARC}}=f(L_{\text{ARC}})$. Это означает, что одна и та же погрешность вычисления δ , пропорциональная K_I , в случае регулирования U_{ARC} приведёт к большей погрешности определения L_{ARC} , чем в случае регулирования R_{ARC} . Поэтому на практике для поддержания постоянной длины дуги чаще обращаются к регулированию R_{ARC} , несмотря на несколько худшие показатели качества регулирования.

Таблица 3

Показатели качества систем регулирования U_{ARC} , I_{ARC} , $Z_{2\phi}$, $Y_{2\phi}$

	Фаза	Параметр	U_{ARC}	R_{ARC}	I_{ARC}	$Z_{2\phi}$	$Y_{2\phi}$
	А	$\Delta_{\text{упр}}$	+200 В	+2,8 мОм	–18,3 кА	+2,6 мОм	–37,4 См
Управляющее воздействие	А	$t_{\text{нар}}$	1 с	1 с	5 с	1,75 с	1,75 с
		$t_{\text{рег}}$	0,8 с	1,65 с	4,4 с	1,5 с	1,5 с
		$K_{ВЗУПР}$	0,018	0,026	0,98	0,016	0,016
	В	Δ (δ)	–1,5 В (–0,28%)	–0,02 мОм (–0,43%)	6,1 кА (5,3%)	–0,02 мОм (–0,28%)	1 См (0,7%)
		$t_{\text{нар}}$	1,35 с	2 с	9 с	1,7 с	1,7 с
		$t_{\text{рег}}$	–	–	7 с	–	–
	С	Δ (δ)	–3,8 В (–0,7%)	0,2 мОм (4,3%)	–3 кА (–2,62%)	0,1 мОм (1,4%)	–2,3 См (–1,64%)
		$t_{\text{нар}}$	1,4 с	1,4 с	4,4 с	1,4 с	1,25 с
		$t_{\text{рег}}$	–	2,5 с	3 с	–	–
	С	$K_{ВЗУПР}$	0,036	0,18	1,16	0,2	0,2
Возмущающее воздействие $\Delta L_{\text{ARC}}=100$ мм	А	Δ (δ)	89 В (12%)	2,15 мОм (29%)	–9 кА (7,86%)	1,9 мОм (25,6%)	–18 См (–17,5%)
		$t_{\text{нар}}$	0,85 с	0,8 с	4,1 с	0,8 с	0,8 с
		$t_{\text{рег}}$	1,8 с	2 с	3,2 с	2 с	2,25 с
	В	Δ (δ)	–7 В (–1,3%)	0,1 мОм (2,2%)	3,25 кА (2,8%)	0,1 мОм (1,35%)	–2,3 См (–1,6%)
		$t_{\text{нар}}$	0,5 с	1,5 с	3,5 с	1,6 с	1,6 с
		$t_{\text{рег}}$	–	–	2,4 с	–	–
	С	$K_{ВЗВОЗМ}$	0,018	0,05	0,3	0,05	0,05
		Δ (δ)	–14 В (–2,6%)	0,25 мОм (5,4%)	–6 кА (–5,2%)	0,2 мОм (2,7%)	–4,3 См (–3%)
		$t_{\text{нар}}$	0,4 с	0,6 с	1,5 с	0,5 с	0,5 с
		$t_{\text{рег}}$	0,025 с	1,8 с	6 с	1,5 с	1,75 с
	С	$K_{ВЗВОЗМ}$	0,018	0,14	0,4	0,14	0,14

Системы регулирования $Z_{2\phi}$ и $Y_{2\phi}$ обладают практически эквивалентными показателями качества регулирования. Но следует отметить, что коэффициент усиления статической характеристики $Z_{2\phi}=f(L_{ARC})$ резко возрастает, начиная со значения $L_{ARC} \approx 800$ мм и $Z_{2\phi} \approx 12$ мОм, в то время как коэффициент усиления характеристики $Y_{2\phi}=f(L_{ARC})$ остаётся близок к постоянному значению на всём диапазоне L_{ARC} . Тем не менее это не создаёт существенного преимущества или недостатка для той или иной системы, поскольку участок резкого возрастания коэффициента усиления характеристики $Z_{2\phi}=f(L_{ARC})$ чаще всего лежит за пределами используемого на практике диапазона регулирования.

Наихудшими показателями качества обладает система регулирования тока дуги. Токи фаз связаны выражением $i_{ARC A} + i_{ARC B} + i_{ARC C} = 0$. Это создаёт большие сложности для индивидуального регулирования, поскольку изменение тока одной фазы приводит к сильному изменению тока в двух других фазах (коэффициент взаимного влияния фаз близок к 1). Это приводит к неустойчивости системы, ограниченности диапазона регулирования и низкому быстродействию. Таким образом, ток дуги нежелательно применять в качестве параметра регулирования для трёхфазного электрического контура ДСП или УСП.

Выводы

1. В настоящее время существуют различные системы автоматического управления перемещением электродов ДСП и УСП. Отличительной особенностью этих систем является использование различных электрических параметров в качестве регулируемой переменной. Наиболее распространенным параметром регулирования является полное сопротивление фазы электрического контура (импеданс) ДСП (УСП) $Z_{2\phi}$, рассчитанное для вторичной стороны печеного трансформатора на основе измерений фазных напряжений и токов. Использование данного параметра обеспечивает процесс регулирования с минимальным влиянием одной фазы на другую, что позволяет поддерживать стабильный режим работы ДСП на начальной стадии расплавления шихты. Недостатком систем, использующих $Z_{2\phi}$, является отсутствие контроля за длиной электрической дуги, что при сильных отклонениях напряжения в питающей сети, например при отсут-

ствии в системе электроснабжения статического тиристорного компенсатора (СТК), может привести к неоптимальным электрическим режимам ДСП и УСП. Аналогичными по динамическим показателям являются системы управления, в которых используют в качестве регулируемого параметра полную проводимость фаз ДСП (УСП) (адмитанс) $Y_{2\phi}$.

2. Использование в качестве регулируемых параметров напряжения электрической дуги U_{ARC} или активного сопротивления дуги R_{ARC} позволяет осуществлять контроль за длинами электрических дуг, что очень важно на конечных стадиях плавки в ДСП, когда дуги горят на жидкий металл в шлаковом слое. Контроль длины дуги в данном случае позволяет исключить перегревы водоохлаждаемых панелей печи, обеспечить максимальный тепловой КПД дуги и создать наилучший электрический режим, при котором коэффициент интенсивности нагрева металла будет максимально возможным. То же самое относится и к установкам УСП, где технологический процесс осуществляется только на жидкой ванне. Однако существуют серьезные ограничения на использование параметров U_{ARC} и R_{ARC} . Обусловлены они тем, что для получения сигнала обратной связи по U_{ARC} или R_{ARC} необходимо проводить вычисления значений этих параметров на основе математической модели электрического контура ДСП, т.к. прямое измерение не доступно. Ключевыми параметрами в математической модели являются активные и индуктивные сопротивления короткой сети, измеряемые при проведении опыта короткого замыкания. При работе ДСП (УСП) значения этих параметров меняются из-за различного гармонического состава тока. Кроме того, в процессе работы печи изменяется градиент напряжения столба дуги, что тоже сказывается на изменении длины L_{ARC} . Это делает возможным использования U_{ARC} и R_{ARC} в качестве регулируемых переменных только на конечных стадиях плавки в ДСП, где значение коэффициента искажения тока минимальное и процесс горения дуги устойчивый. Также эти параметры могут быть использованы при управлении электрическими режимами УСП.

3. Наиболее нестабильной является система автоматического регулирования тока электрической дуги. Как показали исследования, при использовании I_{ARC} в качестве регулируемого

параметра имеет место наибольшее влияние фаз ДСП (УКП) друг на друга. В соответствии с этим, обеспечить стабильный процесс расплавления металла в трехфазной ДСП с использованием системы прямого регулирования токов дуг не представляется возможным. В качестве исключения можно рассматривать однофазные электродуговые установки малой мощности, где проблема взаимного влияния фаз отсутствует.

4. В разработанной специалистами ФГБОУ ВПО «МГТУ» системе автоматического управления перемещением электродов «РАДУГА ПК» используется усовершенствованный адаптивный регулятор импеданса. При условии использования блока коррекции по отклонению напряжения на первичной обмотке трансформатора система регулирования импеданса обеспечивает приемлемую точность регулирования длины дуги на основных стадиях плавки.

Список литературы

1. Свенчанский А.Д. Автоматическое управление электротермическими установками. М.: Энергоатомиздат, 1990. 416 с.
2. Николаев А.А. Повышение эффективности работы статического тиристорного компенсатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи: автореф. ... дис. канд. техн. наук. Магнитогорск, 2009. 20 с.
3. Николаев А.А., Тулупов П.Г. Особенности моделирования гидропривода перемещения электродов сверхмощной электродуговой сталеплавильной печи ДСП-180 // Инновации в науке: сб. статей по материалам XXVII международной научно-практической конференции. Новосибирск: «СибАК», 2013. №27. С. 53–61.
4. Разработка усовершенствованной системы автоматического управления положением электродов дуговых сталеплавильных печей и агрегатов печь-ковш / Николаев А.А., Корнилов Г.П., Тулупов П.Г., Якимов И.А., Повелица Е.В., Ануфриев А.В. // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2014. Т. 1. С. 48–58. Режим доступа: <http://electrical-engineering.ru/>.
5. Николаев А.А., Тулупов П.Г. Исследование гидропривода перемещения электродов сверхмощной электродуговой сталеплавильной печи ДСП-250 ЗАО «ММК Metalurji», г. Искендерун, Турция // Энергетические и электротехнические системы: международный сборник научных трудов. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И.Носова, 2014. Вып. 1, С. 84–95.
6. Анализ и оптимизация электрических режимов сверхмощных дуговых сталеплавильных печей / Корнилов Г.П., Николаев А.А., Храмшин Т.Р., Вахитов Т.Ю. // Электromеталлургия. 2013, №7. С. 2–10.
7. Особенности моделирования сталеплавильной печи как электротехнического комплекса / Корнилов Г.П., Николаев А.А., Храмшин Т.Р., Вахитов Т.Ю., Якимов И.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. №1(41). С. 76–82.
8. Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Логунова О.С. Автоматизация и оптимизация управления выплавкой стали в электродуговых печах: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. 2012. 304 с.
9. Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Ахметов У.Б. Оптимизация управления технологическими процессами в металлургии: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2006. 198 с.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

STUDY OF DIFFERENT METHODS TO DESIGN AUTOMATED ELECTRODE POSITION CONTROL SYSTEMS FOR ELECTRIC ARC FURNACES AND LADLE FURNACES

Nikolaev Aleksandr Arkadyevich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7 (3519) 22-45-87. E-mail: alexniko@inbox.ru.

Kornilov Gennady Petrovich – D.Sc. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7 (3519) 29-84-79. E-mail: korn_mgn@mail.ru.

Povelitsa Evgeny Vyacheslavovich – Postgraduate Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: evpgene@mail.ru.

Tulupov Platon Garrievich – Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: tulupov.pg@mail.ru.

Abstract. The article describes different ways to design automated electrode position control systems for electric arc furnaces and ladle furnaces. All systems were evaluated in terms of control performance, advantages and disadvantages, and described in terms of operation conditions at operating facilities.

Keywords: Electric arc furnace, ladle furnace, automated electrode position control system, adaptive impedance regulator, hydraulic drive for electrode positioning.

References

1. Sventchanskiy A.D. *Avtomaticheskoe upravlenie ehlektrotermicheskimi ustanovkami* [Electrothermal equipment automated control]. Moscow: Energoatomizdat, 1990, 416 p.
2. Nikolaev A.A. *Povyshenie ehffektivnosti raboty staticheskogo tiristorного kompensatora sverkhmoshnoy dugovoy staleplavil'noy pechi* [Improving the efficiency of static var compensator of the ultra-high power electric arc furnace: Abstract of the Ph.D. disserta-

- tion]. Magnitogorsk, 2009, 20 p.
3. Nikolaev A.A., Tulupov P.G. Features of mathematical modeling of hydraulic drives for electrode positioning at ultra-high power electric arc furnace EAF-180. *Innovatsii v nauke: sbornik statej po materialam XXVII mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferentsii* [Innovations in science: Collection of papers presented at the 27th international scientific and practical conference]. Novosibirsk: SibAK, 2013, no. 27, pp.53-61.
4. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Tulupov P.G., Yakimov I.A., Povelitsa E.V., Anufriev A.V. Design of the improved electric arc furnace and ladle furnace electrodes' position automatic control system. *Innovatsii v nauke: sbornik statej po materialam XXVII mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferentsii Ehlektrotehnika: setevoy ehlektronnyj nauchnyj zhurnal* [Electrical engineering: web scientific journal electronic resource], 2014, vol. 1, pp. 48-58.
5. Nikolaev A.A., Tulupov P.G. Research on a hydraulic drive for electrode positioning at the ultra-high power electric arc furnace EAF-250 at CJSC MMK Metalurji in Iskenderun, Turkey. *Ehnergeticheskie i ehlektrotekhnicheskie sistemy: mezhdunarodnyj sbornik nauchnykh trudov* [Power and electrotechnical systems: International collection of research papers]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2014, iss. 1, pp.84-95.
6. Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Khramshin T.R., Vakhitov T.Yu. Analysis and optimization of ultra high power arc furnaces electrical modes. *Ehlektrometallurgiya* [Electrometallurgy]. 2013, no.7, pp. 2-10.
7. Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Khramshin T.R., Vakhitov T.Yu., Yakimov I.A. Features of simulation of an electric arc furnace as an electrotechnical complex. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2013, no. 1(41), pp.76-82.
8. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Logunova O.S. *Avtomatizatsiya i optimizatsiya upravleniya vyplavkoj stali v ehlektrodugovykh pechakh: monografiya* [Automation and optimization of electric steelmaking process control]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2012, 304 p.
9. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Akhmetov U.B. *Optimizatsiya upravleniya tekhnologicheskimi protsessami v metallurgii: monografiya* [Optimization of technological process control in metallurgy: Monograph]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2006, 198 p.

Анализ различных вариантов построения систем автоматического управления перемещением электродов дуговых сталеплавильных печей и установок ковш-печь / Николаев А.А., Корнилов Г.П., Тулупов П.Г., Повелица Е.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №2. С. 90–100.

Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Povelitsa E.V., Tulupov P.G. Study of different methods to design automated electrode position control systems for electric arc furnaces and ladle furnaces. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 2, pp. 90–100.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И СТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 666.9.043.2

БЕСЦЕМЕНТНЫЕ ПОРИЗОВАННЫЕ КОМПОЗИЦИИ

Мирюк О.А.

Рудненский индустриальный институт, Рудный, Казахстан

Аннотация. Статья посвящена исследованию поризации композиций на основе растворов щелочей. Изучено влияние состава щелочного раствора на структуру пенomассы. Установлена повышенная устойчивость пены из растворов $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$. Показана зависимость свойств пенomассы от добавки NaOH в раствор $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$. Выявлена предпочтительность синтетических пенообразователей на формирование пористой структуры щелочесиликатных композиций. Показана возможность дополнительной поризации пенomассы за счет газообразующей добавки и пустотелых гранул. Выявленные особенности поризации положены в основу технологии бесцементных пенобетонов.

Ключевые слова: щелочесиликатные композиции, образование пор, пенomасса, структура.

Введение

Ячеистый бетон выгодно отличается многообразием номенклатуры изделий, доступностью сырьевой базы, сравнительной простотой технологии, экологичностью. Дальнейшее развитие технологии ячеистых бетонов неразрывно связано с решением актуальной проблемы – улучшением прочностных и теплофизических свойств за счет оптимизации структуры. Решение этой сложной технологической проблемы предусматривает вовлечение в производство ячеистых бетонов материалов, обеспечивающих образование замкнутой мелкой пористости и формирование прочного каркаса межпоровых перегородок. Доказана возможность и целесообразность синтеза бесцементных композиций, которые благодаря особенностям характера твердения и фазового состава гидратных образований обеспечивают высокопористую структуру, превышающую по прочности цементные аналоги [1].

Перспективны щелочесиликатные вяжущие, которые затворяют щелочными растворами, активизирующими твердение порошкового наполнителя [2–7]. Жидкое стекло – традиционная основа композиций – соответствует требованиям сырьевой обеспеченности и малознергоемких технологий. В качестве наполнителя щелочесиликатных вяжущих используют силикатные и алюмосиликатные материалы [5–10].

Поризация – определяющая стадия технологического процесса получения ячеистых материалов.

Цель работы – исследование влияния вещественного состава сырьевой смеси на формирование структуры высокопористых щелочесиликатных композиций.

Теория, материалы и методы исследования, технические и технологические разработки

Объектом исследования послужили щелочесиликатные композиции, содержащие техногенный наполнитель (металлургические шлаки, стеклобой).

В качестве щелочесодержащих затворителей использовали водные растворы гидроксида натрия NaOH (плотность 1200 кг/м^3), карбоната натрия Na_2CO_3 (плотность 1200 кг/м^3); жидкое стекло (плотность 1250 кг/м^3).

Для поризации масс использовали поверхностно-активные вещества различного происхождения: протеиновый пеноконцентрат «Унипор», пенообразователи на синтетической основе «Fairy» и «Zelle – 1».

Щелочесиликатные пенomассы готовили одностадийным методом: суспензию из всех компонентов вспенивали в смесителе миксерного типа в течение 2 мин. Скорость вращения вала с лопастями 800–1000 об/мин. Предпочтительность одностадийного метода обусловлена формированием устойчивой мелкой пористости пенomассы.

Для получения композиций использовали щелочные затворители, состав которых влияет на скорость и показатели твердения вяжущего.

Свойства пеномассы оценивали по кратности и плотности. Образцы пенобетона размером 40×40×40 мм твердели в нормальных условиях.

Для сравнения полученных пен использована визуальная оценка крупности, однородности и устойчивости во времени. Мелкими обозначены пены с размером ячеек 0,5 мм; крупными – более 1 мм.

Однородность пористой структуры охарактеризована равномерным распределением пор в массе, отсутствием крупных воздушных полостей.

Устойчивость пеномассы оценена по продолжительности сохранения первоначального объема: высокая устойчивость – не менее 30 мин; низкая – разрушается вскоре после извлечения из смесителя.

Результаты исследования и их обсуждение

Исследованы пены, образованные на основе водных растворов гидроксида и карбоната натрия, жидкого стекла. Пенообразователи добавляли в количестве 2%. Раствор гидроксида натрия плотностью 1200 кг/м³ не вспенивался, поэтому использовали его в сочетании с водой в равных соотношениях (табл. 1).

Таблица 1
Влияние состава щелочесодержащего раствора на свойства пены

Состав раствора	Пенообразователь	Кратность пены	Плотность пены, кг/м ³	Качественная характеристика пены		
				Размер	Однородность пористости	Устойчивость
NaOH: вода (1:1)	«Fairy»	1,6	690	Крупные	Неоднородная	Низкая
	«Zelle – 1»	8,5	130	Мелкие	Однородная	Высокая
	«Унипор»	7,5	150	Средние	Неоднородная	Средняя
Na ₂ CO ₃	«Fairy»	2,0	590	Крупные	Неоднородная	Средняя
	«Zelle – 1»	8,0	150	Очень мелкие	Однородная	Высокая
	«Унипор»	2,5	480	Мелкие	Неоднородная	Низкая
Na ₂ O(SiO ₂)	«Fairy»	7,0	180	Очень мелкие	Однородная	Высокая
	«Zelle – 1»	6,5	190	Мелкие	Однородная	Высокая
	«Унипор»	6,5	190	Средние	Неоднородная	Средняя

Использование протеинового пенообразовате-

ля «Унипор» для всех исследуемых щелочных растворов не обеспечивает пены требуемой структуры и устойчивости. Пена из раствора карбоната натрия и «Унипора» разрушается почти мгновенно после отключения смесителя. Использование протеинового пенообразователя «Унипор» сопровождается коагуляционными процессами и образованием сгустков в жидком стекле. Пена, образованная с применением «Унипора», неоднородна по структуре и весьма неустойчива. Протеиновые поверхностно-активные вещества катионного или амфотерного типа, как правило, эффективны только в слабокислой среде.

Состояние пен на основе синтетического пенообразователя «Fairy» неоднозначно: мелкая структура и высокая устойчивость пены – из жидкого стекла; крупнопористая легко разрушаемая пена – на основе раствора NaOH.

Целесообразность применения синтетических пенообразователей подтвердили испытания комбинированных растворов «Na₂O(SiO₂)_n: NaOH»; «Na₂O(SiO₂)_n: Na₂CO₃». Пена на основе синтетического пенообразователя Fairy выгодно отличается мелкопористым строением, низкой плотностью и устойчивостью. Предпочтительность синтетических пенообразователей для жидкого стекла обусловлена их анионным или неионогенным типом. Такие пенообразователи содержат натриевые соли алкилсульфонатов и алкилбензосульфокислот и наиболее эффективны в области pH = 7,0–10,5.

Прочностные показатели щелочесиликатного вяжущего, затворенного растворами различного состава, располагаются в порядке возрастания Na₂CO₃→NaOH→Na₂O(SiO₂)_n. Исследования показали предпочтительность затворения комбинированным раствором Na₂O(SiO₂)_n и NaOH, который обеспечивает ускорение твердения вяжущего и повышение показателей прочности. При добавлении гидроксида натрия в жидкое стекло прослеживается тенденция уменьшения вспениваемости массы: снижение кратности и повышение плотности пены.

Особенность исследуемых композиций – использование для затворения жидкости с регулируемым составом и плотностью. Жидкое стекло выполняет две функции: в сочетании с пенообразователем является компонентом технической пены и одновременно компонентом щелочесиликатного вяжущего.

Сопоставление характеристик пен, полученных при равных условиях на основе различных жидкостей, выявило пониженную кратность (вода – 12, жидкое стекло – 5) и повышенную среднюю плотность (вода – 80 кг/м³, жидкое стекло – 200 кг/м³) пены из жидкого стекла. Истечение жидкости из пены в результате синерезиса в пеномассах отличалось незначительно.

Исследование пены, образованной из жидкого стекла различного состояния, свидетельствует о предпочтительности раствора $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$ плотностью 1200–1300 кг/м³, при которой образуется пена необходимого качества и достигается технологически обоснованная скорость твердения материала. Повышенные значения плотности жидкого стекла снижают выход пеномассы, при низких значениях плотности – медленное упрочнение структуры бетона.

Щелочесиликатные композиции состоят из жидкого стекла и порошкообразного наполнителя (металлургического шлака или боя стекла), который влияет на реологические свойства и вспениваемость массы. Для поризации щелочесиликатной композиции использован пенообразователь Fairy. Увеличение доли наполнителя закономерно повышает плотность массы за счет уменьшения пористости материала (табл. 2 и 3). Для получения стойкой к седиментации пеномассы с низкими значениями плотности соотношение «жидкое стекло: наполнитель» целесообразно принять равным «1:1,85–1:2,00». Композиции из стеклобоя менее чувствительны к изменению доли наполнителя.

Структура пенобетона чувствительна к изменению вещественного состава формовочной массы. Сопоставление показателей шлакощелочных композиций на синтетических пенообразователях различного типа выявило, что использование «Zelle – 1» при прочих равных условиях приготовления пеномассы обеспечивает форми-

рование укрупненных ячеек со средним размером 0,8 – 1,0 мм (рис. 1) и пониженную плотность материала. Пенобетон на основе металлургического шлака характеризуется меньшими по размеру ячейками по сравнению с композитом на основе стеклобоя (рис. 2). Для активизации твердения металлургического шлака целесообразно введение дополнительного щелочного компонента (20% NaOH). Добавление гидроксида натрия уплотняет структуру камня вяжущего, увеличивая долю аморфной «склеивающей» массы (рис. 3).

Таблица 2

Влияние доли шлака на свойства поризованного материала

Жидкое стекло: шлак	Кратность пеномассы	Плотность пенобетона, кг/м ³	Прочность при сжатии пенобетона, МПа
1: 1,45	6,4	260	0,3
1: 1,65	6,3	320	0,4
1: 1,85	6,1	350	0,5
1: 2,00	5,8	460	0,7

Таблица 3

Влияние доли стеклобоя на свойства поризованного материала

Жидкое стекло: стеклобой	Кратность пеномассы	Плотность пенобетона, кг/м ³	Прочность при сжатии пенобетона, МПа
1: 1,45	5,1	400	0,8
1: 1,65	5,2	420	1,0
1: 1,85	5,1	430	1,1
1: 2,00	5,0	480	1,2

Для повышения теплозащитных свойств композиций исследована возможность дополнительной поризации с помощью газообразующего компонента.

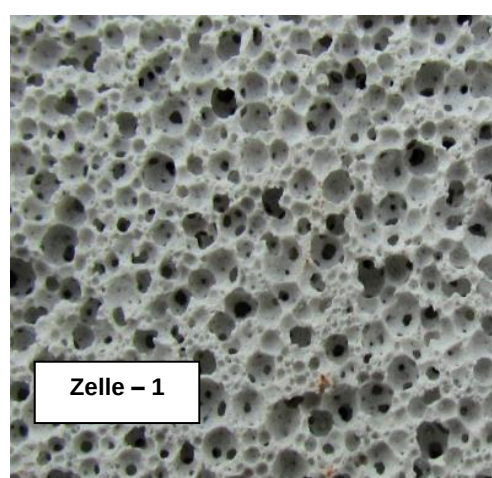


Рис. 1. Композиции с использованием различных пенообразователей

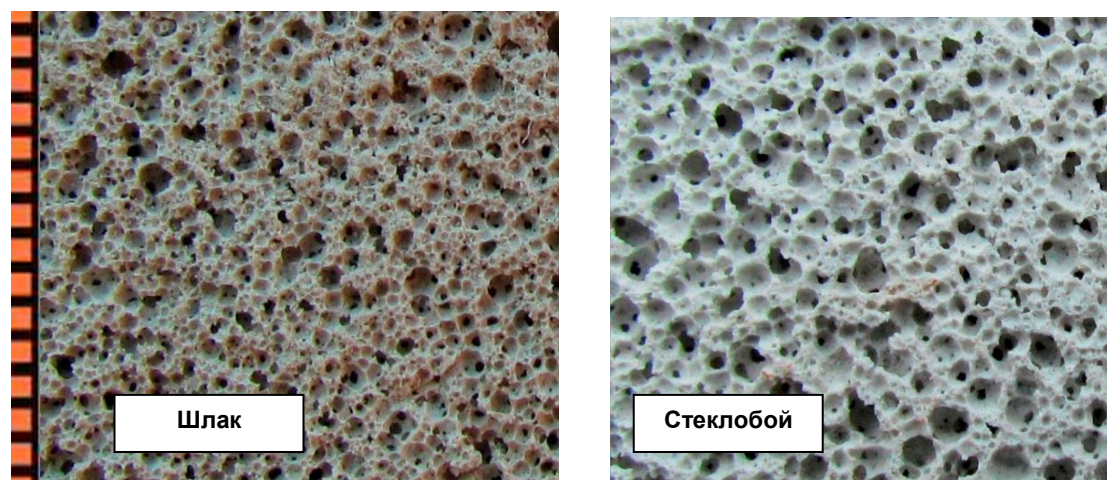


Рис. 2. Композиции с использованием различных наполнителей

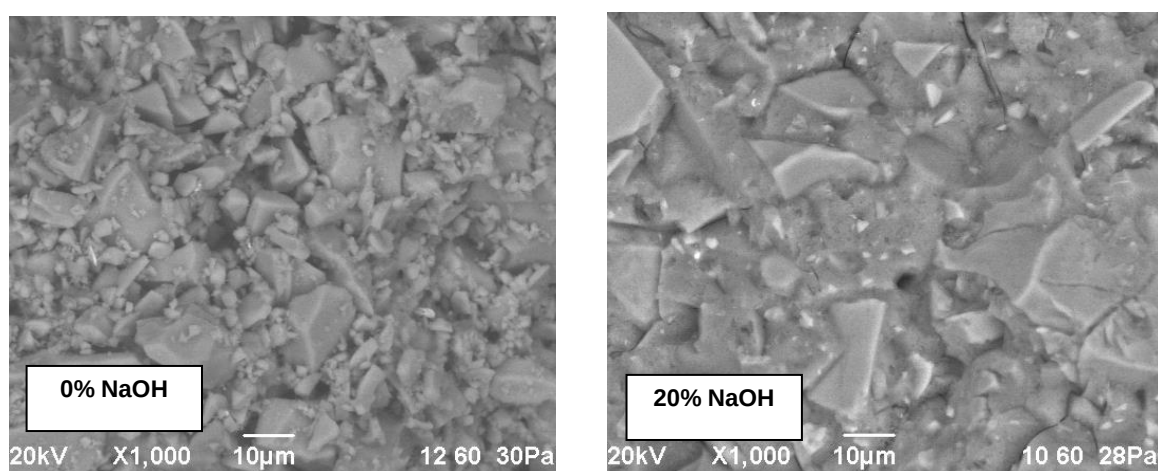


Рис. 3. Влияние гидроксида натрия на структуру шлакощелочного камня

Традиционный газообразователь ячеистых бетонов – алюминиевая пудра – способен одновременно играть роль водоупрочняющего отвердителя, так как продукты его взаимодействия с жидким стеклом дополнительно модифицируют щелочно-силикатную матрицу, повышая ее водостойкость. Однако повышенная зависимость кинетики газовыделения от состояния сырьевой смеси и поверхности порообразователя, дороговизна порошка обусловили поиск другого газообразующего компонента. В качестве порообразователя использован концентрированный водный раствор перекиси водорода H_2O_2 (технический пергидроль, концентрация 37%). Газообразование с участием H_2O_2 независимо от значения pH среды, при разложении поризатора выделяется нетоксичный и негорючий кислород.

Газообразователь вливали в сырьевую массу перед вспениванием. Состав композиции характеризовался соотношением «жидкое стекло: стеклобой – 1:2». Газовыделение происходило в течение 30–40 мин после заполнения формы вспененной массой, ускорилось при тепловом воздей-

ствии (температура 30°C). Соотношение уровней массы до и после насыщения газом характеризовали коэффициентом вспучивания, который рассчитывали по завершению поризации. Вспучивание массы, возрастающее при увеличении доли перекиси водорода, зависит от вида пенообразователя (рис. 4). Пониженные значения коэффициента вспучивания смеси на основе Zelle –1 обусловлены, по-видимому, меньшей газодерживающей способностью пеномассы. Это подтверждает «перфорация» межпоровых перегородок (рис. 5), которая усиливается с повышением концентрации газообразователя. Поэтому содержание перекиси водорода в смеси следует ограничить 1,75–2,25%. Выявлено, что предварительный подогрев жидкого стекла формирует мелкую равномерно распределенную пористость.

Для получения высокопористых пеногазощелочесиликатных композиций в сырьевую массу вводили пустотелые микросферы. Добавление до 10% поризованного наполнителя – микросферы позволяет регулировать характер структуры щелочесиликатных ячеистых композиций (рис. 6).

Таблица 4

Свойства пеногазобетона на основе стеклобоя

Вид пенообразователя	Концентрация H_2O_2 в смеси, %	Кратность пеномассы	Коэффициент вспучивания, %	Средняя плотность пеногазобетона, $кг/м^3$
Fairy	0	5,4	–	500
	0,75		14	440
	1,25		20	400
	1,75		28	340
	2,25		42	280
	2,75		57	230
Zelle-1	0	5,6	–	480
	0,75		10	420
	1,25		18	380
	1,75		22	340
	2,25		31	270
	2,75		37	210

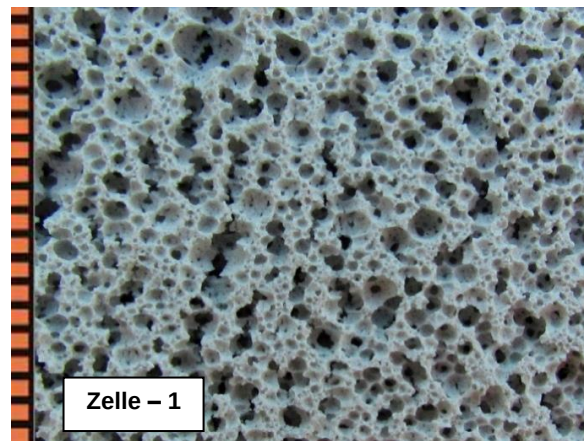
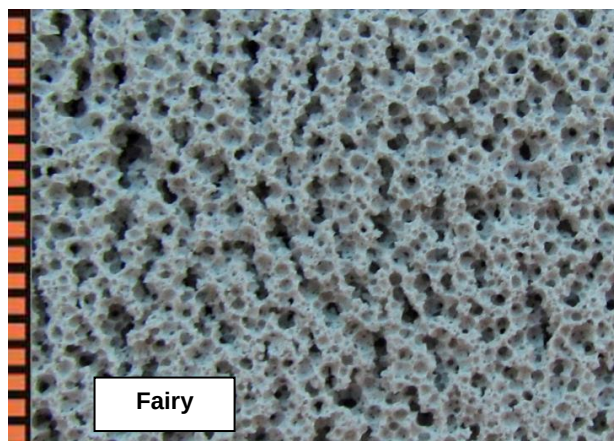
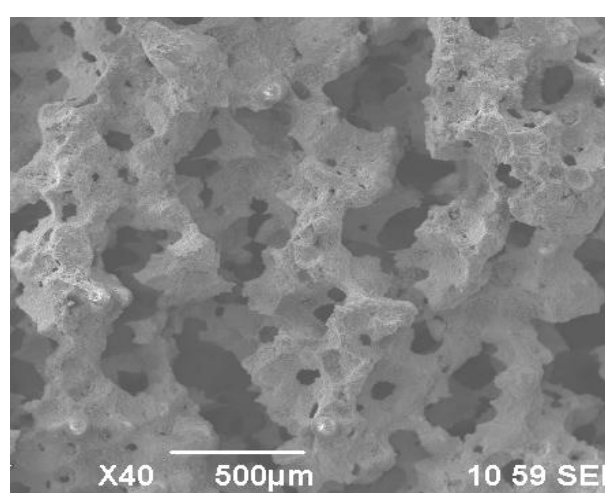
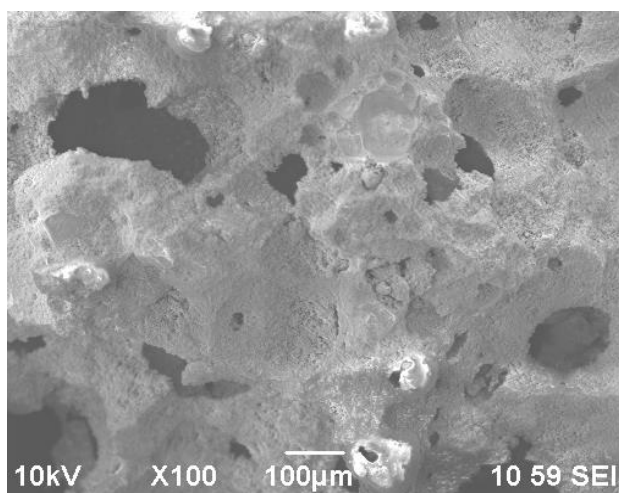
Рис. 4. Пеногазобетон на основе различных пенообразователей и 1,75% H_2O_2 

Рис. 5. Микроструктура щелочесиликатного пеногазобетона

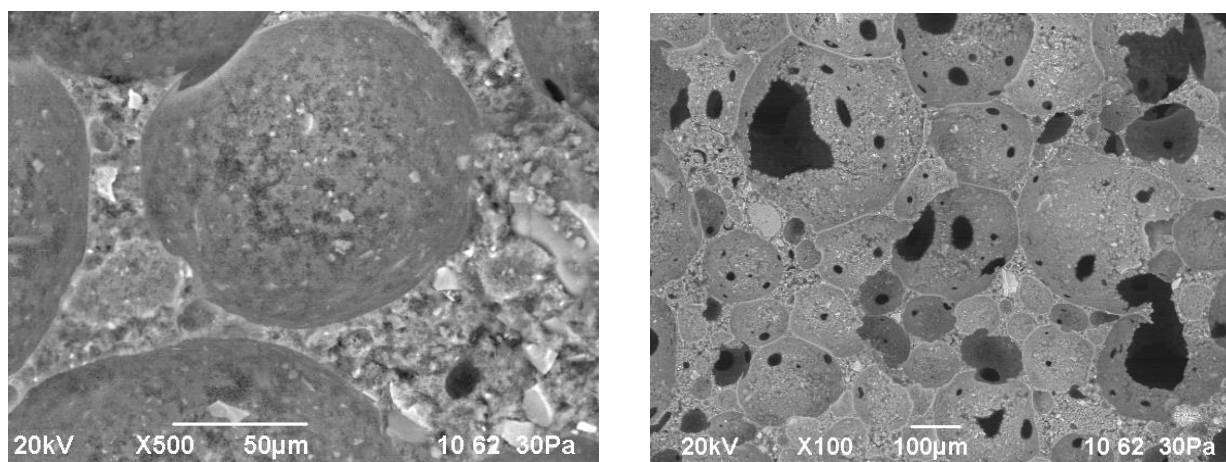


Рис. 6. Микроструктура щелочесиликатного пеногазобетона с микросферой

Твердение бесцементных щелочесиликатных композиций возможно по беспрогревной технологии, однако для обеспечения стабилизации высокопористой структуры ячеистых материалов в технологически необходимый период целесообразно осуществлять тепловую обработку в воздушных условиях при температуре 50–60°C. Условия твердения поризованных композиций следует назначать с учетом факторов влияния на процессы структурообразования: плотность затворителя; дисперсность порошковых компонентов; состав техногенного наполнителя и вещественный состав вяжущего.

Результаты исследований положены в основу технологического проектирования производства по выпуску изделий из бесцементных ячеистых бетонов.

Разработана технологическая схема производства бесцементных ячеистых изделий на основе жидкого стекла и техногенного наполнителя – порошкообразного стеклобоя. Щелочесиликатные ячеистые материалы рекомендованы для трех групп пеногазобетонных изделий: блоки; пазогребневые плиты; скорлупы.

Подготовительный этап включает помол стеклобоя до состояния порошка и приготовление раствора жидкого стекла из сухого порошка силикат-глыбы.

В технологической схеме предусмотрено приготовление пеногазобетонных литых смесей по одностадийной технологии. Сухие компоненты смеси добавляют в жидкое стекло с пенообразователем и газообразователем. Процесс поризации осуществляется в турбулентно-кавитационном смесителе, снабженном лопастями минимального аэродинамического сопротивления.

Формование блоков осуществляется по результирующей технологии на конвейерной линии. Пазогребневые плиты формуют в кассетных формах. Скорлупы изготавливают в специальных индивидуальных формах на полуконвейерной линии.

Отформованные пеногазобетонные изделия подвергается тепловой обработке в конвективной сушилке при температуре 50°C в течение 8 ч.

Технико-экономические расчеты подтвердили эффективность производства и применения бесцементных ячеистых бетонов. Анализ чувствительности показал высокую устойчивость проекта к изменению потребности в инвестициях и суммарного положительного денежного потока. Индекс прибыльности для щелочесиликатных композитов – 3,298.

Анализ показателей прибыли, рентабельности и эффективности инвестиций свидетельствует о том, что инновационный проект по технологии бесцементных ячеистых бетонов следует считать эффективным и рекомендовать для реализации на производстве.

Выводы

Показана возможность и доказана целесообразность получения высокопористых композиций на основе бесцементных щелочесиликатных материалов, содержащих техногенный наполнитель.

Выявлены способы увеличения пористости бесцементных композиций за счет поэтапного дополнительного введения порообразующих компонентов. Использование инновационных приемов комплексной поризации обеспечивает формирование устойчивой полимодальной пористости и способствует повышению теплозащитных свойств щелочесиликатных композиций.

Список литературы

1. Теплоизоляционные материалы и конструкции / Ю.Л. Бобров [и др.]. М.: ИНФРА-М, 2003. 268 с.
2. Вязущие и композиционные материалы контактного твердения / В.Д. Глуховский [и др.]. Киев: Высша шк., 1991. 242 с.
3. Структурообразование и свойства композитов на основе боя стекла / В.И. Соломатов [и др.] // Изв. вузов. Строительство. 2000. № 9. С. 16–22.
4. Pinto A.T. Alkali-activated metakaolin based binders // PhD Thesis. University of Minho. 2004, vol. 11, no. 2, April 1. P. 38–43.
5. Davidovits J. Geopolymer Technologies and extractive metallurgy environmentally safe tailing solidification and disposal // SME Annual Meeting Phoenix, Arizona, January 25–28, 1988. Arizona, 1988. P. 1–7.
6. Ambruster T., Gunter M.E. Stepwise dehydration of heulandite-clinoptilolite from Succor Creek // Oregon, U.S.A.: A single-crystal X-ray study at 100 K // *Ameren Mineral*. 1991. Vol. 76. P. 1872–1883.
7. Газобетоны на основе композиционных шлакощелочных вяжущих / Н.Р. Рахимова [и др.] // *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. Технологии бетонов*. 2009. №7–8. С. 34–35.
8. Лотов В.А., Кутугин В. А. Формирование пористой структуры пеносиликатов на основе жидкостекольных композиций // *Стекло и керамика*. 2008. №1. С. 6 – 10.
9. Dietmar Briesemann. Entwicklungstendenzen und Bewertung von Gas-beton sowie von Gasbetonbauweisen in der BRD // *Bauzeitung*. Berlin: Verlag für Bauwesen. 1990. S. 114–115.
10. Мирюк О.А. Поризация щелочесодержащих масс // *Бетон и железобетон в Украине*. 2014. № 1. С. 2–6.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

POROUS CEMENT-FREE COMPOSITIONS

Miryuk Olga Aleksandrovna – D.Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of Construction and Construction Materials Science, Rudny Industrial Institute Republican State Enterprise Operating on the Basis of Economic Control Rights, Rudny, Kazakhstan. Phone: +7 (71431) 5-07-03. E-mail: psm58@mail.ru.

Abstract. This article is devoted to the formation of porous compositions based on alkali solutions. The effect of an alkali solution composition on foam mass was studied. The augmented stability of foam from $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$ solutions was revealed. The dependence of foam mass properties on the addition of NaOH into $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$ solution was shown. It was revealed that synthetic foaming agents were preferable to form a porous structure of alkali-silicate compositions. It was shown that additional formation of porous foam mass was possible due to the addition of gas-forming agents and hollow granules. The revealed features of the formation of porous compositions served as a basis for a cement-free foam concrete manufacturing process.

Keywords: Alkali-silicate compositions, pore formation, foam mass, structure.

References

1. Bobrov Yu.L. et al. *Teploizolyatsionnye materialy i konstruktii* [Thermal insulation materials and structures]. Moscow: INFRA-M, 2003, 268 p.
2. Glukhovskiy V.D. *Vyazhushchie i kompozitsionnye materialy kontaktnogo tverdeniya* [Cementing and composite contact hardening materials]. Kiev: High School, 1991, 242 p.
3. Solomatov V.I. et al. *Strukturoobrazovanie i svoystva kompozitov na osnove boya stekla* [Structure formation and properties of composites based on broken glass]. *Izvestiya vuzov. Stroitelstvo* [News of universities. Construction]. 2000, no. 9, pp. 16–22.
4. Pinto A.T. Alkali-activated metakaolin based binders. PhD Thesis. University of Minho. 2004, vol. 11, no. 2, April 1, pp. 38–43.
5. Davidovits J. Geopolymer Technologies and extractive metallurgy environmentally safe tailing solidification and disposal. SME Annual Meeting, Phoenix, Arizona, January 25 –28, 1988. Arizona, 1988, pp. 1–7.
6. Ambruster T. Gunter M.E. Stepwise dehydration of heulandite-clinoptilolite from Succor Creek. Oregon, U.S.A.: A single-crystal X-ray study at 100 K. *Ameren Mineral*, 1991, vol. 76, pp. 1872–1883.
7. Rakhimova N.R. et al. Aerated concrete based on composite slag-alkaline binders. *Stroitelnye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka. Tekhnologii betonov*. [Building materials, equipment, technologies of the 21st century. Concrete technologies], 2009, no. 7–8, pp. 34–35.
8. Lotov V.A., Kutugin V.A. The formation of a porous structure of foamed silicates based on liquid glass compositions. *Steklo i keramika* [Glass and ceramic], 2008, no. 1, pp. 6–10.
9. Dietmar Briesemann. Entwicklungstendenzen und Bewertung von Gas-beton sowie von Gasbetonbauweisen in der BRD. *Bauzeitung*. Berlin: Verlag für Bauwesen, 1990, pp. 114–115.
10. Miryuk O.A. Formation of porous compositions in alkali-containing mass. *Beton i zhelezobeton v Ukraine* [Concrete and reinforced concrete in Ukraine], 2014, no. 1, pp. 2–6.

Мирюк О.А. Бесцементные поризованные композиции // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №2. С. 101–107.

Miryuk O.A. Porous cement-free compositions. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 2, pp. 101–107.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Арефьев Степан Александрович – преп. кафедры разработки месторождений открытым способом, ФГБОУ ВПО «Уральский государственный горный университет», Екатеринбург, Россия. Тел.: 8-(343)-257-22-44. E-mail: arefevsa@yandex.ru.

Баранов Владимир Николаевич – канд. техн. наук, доц. кафедры литейного производства, ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия. E-mail: vnbar79@mail.ru.

Гильманшина Татьяна Ренатовна – канд. техн. наук, доц. кафедры литейного производства, ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия. E-mail: gtr1977@mail.ru.

Гуэрра Хосе Алонсо – заместитель генерального директора металлургического завода Хосе Марти, Куба.

Данилова Юлия Владимировна – аспирантка кафедры машиностроительных и металлургических технологий, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: (3519) 29-84-81. E-mail: j.v.danilova@inbox.ru.

Дзюба Антон Юрьевич – начальник лаборатории сортового проката НТЦ, ОАО «ММК», Магнитогорск, Россия.

Довженко Николай Николаевич – д-р техн. наук, директор института нефти и газа, ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия. E-mail: n.dovzhenko@bk.ru.

Дружков Виталий Гаврилович – канд. техн. наук, доц. кафедры металлургии черных металлов, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: (3519) 29-84-30.

Ефимова Юлия Юрьевна – канд. техн. наук, доц. кафедры машиностроительных и металлургических технологий, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

Загиров Николай Наильич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Обработка металлов давлением», ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия. Тел.: (391) 206-37-31. E-mail: sbs270359@yandex.ru.

Карманов Вадим Владимирович – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Инновационные технологии машиностроения» ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия. Тел.: 8 (342) 239-15-08. E-mail: karmanovs@yandex.ru.

Кинзин Дмитрий Иванович – канд. техн. наук, доц. кафедры обработки металлов давлением, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: kinzin@mail.ru.

Ковалева Ангелина Адольфовна – канд. техн. наук, доц. кафедры «Металловедение и термическая обработка металлов», ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия. Тел.: (391) 206-36-75. E-mail: angeli-kovaleva@yandex.ru.

Коваль Ольга Евгеньевна – студентка кафедры «Металловедение и термическая обработка металлов», ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия. Тел.: (391) 206-36-75.

Козлов Александр Васильевич – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Технология машиностроения, станки и инструменты» ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ), филиал в Златоусте, Россия. E-mail: a_kozlov55@mail.ru.

Коляда Людмила Григорьевна – канд. техн. наук, доц. кафедры химии, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: (3519)29-85-33. E-mail: chem@magtu.ru.

Корионов Максим Анатольевич – магистр кафедры «Динамика и прочность машин» ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия. Тел.: 8 (342) 239-13-40. E-mail: dpm@pstu.ru.

Корнилов Геннадий Петрович – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой электроснабжения промышленных предприятий, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: 8 (3519) 29-84-79. E-mail: kom_mgn@mail.ru.

Кремнева Анастасия Владиславовна – ст. преп. кафедры химии, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: a-kremneva@mail.ru.

Кузнецов Игорь Александрович – аспирант кафедры «Системы автоматического управления» Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.

Левандовский Сергей Анатольевич – канд. техн. наук, доц. кафедры обработки металлов давлением, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: levandovskiy@mail.ru.

Лехов Олег Степанович – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой механики Российского государственного профессионально-педагогического университета, Екатеринбург, Россия. Тел.: (343)341-79-40.

Лыткина Светлана Игоревна – канд. техн. наук, доц. кафедры материаловедения и технологии обработки материалов, ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия. E-mail: svetka-lisa@mail.ru.

Медяник Надежда Леонидовна – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой химии, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: chem@magtu.ru.

Миронов Кирилл Андреевич – аспирант ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)», Челябинск, Россия. E-mail: mironovkir@yandex.ru.

Мирсагдиев Орифжон Алимович – ассистент кафедры электрической связи и радио Ташкентского института инженеров железнодорожного транспорта, Ташкент, Узбекистан. E-mail: oamirsagdiev@yandex.ru.

Мирюк Ольга Александровна – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой строительства и строительного материаловедения Республиканского государственного предприятия на праве хозяйственного ведения «Рудненский индустриальный институт», Рудный, Республика Казахстан. Тел. 8(71431) 5-07-03. E-mail: psm58@mail.ru.

Моллер Александр Борисович – д-р техн. наук, проф. кафедры обработки металлов давлением ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: amoller@mail.ru.

Неусыпин Константин Авенирович – д-р техн. наук, проф. кафедры «Системы автоматического управления» Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия. E-mail: neusipin@mail.ru.

Николаев Александр Аркадьевич – канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой автоматизированного электропривода и мехатроники, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: 8 (3519) 22-45-87. E-mail: alexniko@inbox.ru.

Новицкий Руслан Витальевич – начальник сортового цеха, ОАО «ММК», Магнитогорск, Россия.

Олина Анна – инженер лаборатории по развитию полупродуктов Mubea IT Spring Wire, Простев, Чешская Республика.

Ольховик Алексей Яковлевич – магистрант кафедры «Обработка металлов давлением», ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия. Тел.: (391) 206-37-31.

Панин Юрий Валерьевич – аспирант кафедры «Динамика и прочность машин», ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия. Тел.: 8 (342) 239-13-40. E-mail: dpm@pstu.ru.

Повелица Евгений Вячеславович – аспирант кафедры электроснабжения промышленных предприятий, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: evrgene@mail.ru.

Полякова Марина Андреевна – канд. техн. наук, доц. кафедры машиностроительных и металлургических технологий, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: (3519) 29-84-81. E-mail: m.polyakova-64@mail.ru.

Пролетарский Андрей Викторович – д-р техн. наук, проф., декан факультета «Информатика и системы управления» Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.

Прохоров Иван Евгеньевич – канд. техн. наук, доц. кафедры металлургии черных металлов ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

Рахмангулов Александр Нельевич – д-р техн. наук, доц. кафедры промышленного транспорта, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: 8 (3519) 29-85-16. E-mail: ran@logintra.ru.

Рубин Геннадий Шмудевич – канд. техн. наук, доц. кафедры технологии, сертификации и сервиса автомобилей, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: (3519) 29-84-30. E-mail: rubingsh@gmail.com.

Саранча Сергей Юрьевич – аспирант кафедры обработки металлов давлением, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

Сериков Егор Сергеевич – ведущий инженер группы по прокатному производству НТЦ, ОАО «ММК», Магнитогорск, Россия.

Суворов Андрей Леонидович – студент 5 курса ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ), филиал в Златоусте, Россия. E-mail: als_2991@mail.ru.

Трофимов Виктор Николаевич – д-р техн. наук, проф. кафедры «Динамика и прочность машин», ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия. Тел.: 8 (342) 239-13-40. E-mail: tvn_perm@mail.ru.

Туев Михаил Юрьевич – доц. кафедры механики Российского государственного профессионально-педагогического университета, Екатеринбург, Россия. Тел.: (343) 370-24-93.

Тулупов Олег Николаевич – д-р техн. наук, проф. кафедры обработки металлов давлением, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: tulupov@mail.ru.

Тулупов Платон Гарриевич – студент 4 курса кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: tulupov.pg@mail.ru.

Тулупова Наталья Александровна – доц. кафедры обработки металлов давлением, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

Худогов Сергей Александрович – ст. преподаватель кафедры прикладной механики, ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия. E-mail: doktor63@yandex.ru.

Шеркунов Виктор Георгиевич – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Машины и технологии обработки материалов давлением» ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ), Челябинск, Россия. E-mail: sherkunovvg@susu.ac.ru.

Ширшов Михаил Юрьевич – аспирант института металлургии, машиностроения и материаллообработки ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: shirshov1989@mail.ru.

Шурыгин Владимир Иванович – главный калибровщик НТЦ, ОАО «ММК», Магнитогорск, Россия.

УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

Мы приглашаем Вас к участию в нашем журнале в качестве авторов, рекламодателей и читателей. Журнал формируется по разделам, отражающим основные направления научной деятельности ученых МГТУ, в частности:

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

ТРЕБОВАНИЯ К СТАТЬЯМ, ПРИНИМАЕМЫМ К ПУБЛИКАЦИИ

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

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

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

1.3. Аннотация (100-250 слов). Включает гипотезу, цель, эксперименты и методы, основные результаты, применение результатов исследования в промышленности (излагается в прошедшем времени).

Онлайн-перевод запрещается!

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

2. СТРУКТУРА ОСНОВНОЙ ЧАСТИ СТАТЬИ

2.1. Введение (постановка проблемы)

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

2.3. Результаты исследования и их обсуждение

2.4. Заключение (выводы)

2.5. Список литературы (на русском и английском языках)

3. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

3.1. Рекомендуемый объем статьи – 6-8 стр.

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

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

- **шрифт** – **Times New Roman**, размер – 14 пт, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический;
- при вставке **формул** использовать встроенный редактор формул **Microsoft Equation** со стандартными установками, применяется только сквозная нумерация;
- **рисунки и фотографии**, вставленные в документ, должны быть четко выполнены, допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров (толщины линий и размеры обозначений должны обеспечивать четкость при уменьшении рисунка до рациональных размеров), в форматах *.TIF, *.JPG, с разрешением **не менее 300 dpi**, B&W – для черно-белых иллюстраций, Grayscale – для полутонов. Максимальный размер рисунка с подписью – 150×235 мм. В тексте статьи должны быть подрисовочные подписи в местах размещения рисунков. Например:

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

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

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

4. ДОКУМЕНТЫ, ПРИЛАГАЕМЫЕ К СТАТЬЕ

4.1. Экспертное заключение о возможности опубликования.

4.2. Договор.

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

Статьи проходят обязательное научное рецензирование.

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

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

Телефоны: (3519) 29-85-26, 22-14-93.

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